



UNIVERSIDADE DO MINHO

ESCOLA DE ENGENHARIA

**RESISTIVIDADE ELÉCTRICA E O CONTROLO DE QUALIDADE DE
BETÃO**

Paula Cristina Ferreira da Silva

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL DA
UNIVERSIDADE DO MINHO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM ENGENHARIA CIVIL – CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO
SUSTENTÁVEL

GUIMARÃES, OUTUBRO 2011

AGRADECIMENTOS

Com a conclusão da presente dissertação, gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos a pessoas e entidades, que de uma forma ou de outra contribuíram para a concretização deste trabalho.

Ao Professor Rui Miguel Ferreira, orientador desta dissertação, expresso os meus sinceros agradecimentos, pela sua orientação cuidada, pelos seus ensinamentos e pela sua criatividade. A sua experiência científica e a sua análise crítica foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento muito especial, de gratidão e admiração, dirigido ao Professor Joaquim Figueiras, pelos seus ensinamentos, pela sua incessante motivação à investigação e ao conhecimento e na disponibilização de todos os recursos, para a realização da presente dissertação no LABEST.

Um agradecimento, muito especial, dirigida à Engenheira Helena Figueiras, pelo seus ensinamentos, pelo seu apoio científico, pela sua ajuda, e principalmente pela sua amizade... obrigado Helena.

À Professora Sandra Nunes, gostaria muito de agradecer os seus ensinamentos, apoio e pelo seu contributo valioso na fase final do trabalho, na revisão cuidada e minuciosa do presente texto.

Um agradecimento muito especial dirigido aos técnicos do LABEST que me apoiaram nas mais diversas tarefas, Cláudio Ferraz, ao Senhor Alberto Monteiro e à Cecília Silva (ex-colaboradora). Este agradecimento estende-se aos colaboradores externos, Amândio Pinto e Rémy Faria, pelo apoio e também pela amizade.

Agradeço ao Engenheiro Lino Maia, pelos seus ensinamentos e apoio em alguns dos trabalhos apresentados neste trabalho. Ao Engenheiro José Santos, um agradecimento muito especial, pelo apoio em várias questões relacionadas com a informática... muito obrigado.

Quero também expressar o meu agradecimento às empresas pelos materiais gentilmente cedidos, SECIL, Comital e pela SIKA.

À Professora Joana Coutinho, à Professora Ana Maria Sarmento e ao Professor Carlos Félix, pela simpatia, amizade e disponibilidade demonstradas no desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria também de deixar um agradecimento às funcionárias do LABEST e da Secção de Estruturas, Cláudia Correia e Marta Lima, pela colaboração e também pela amizade.

Um agradecimento muito especial dirigido ao amigo, Américo Dimande, pelo seu apoio incessante ao longo desta dissertação e principalmente pela sua amizade.

Por último, gostaria de agradecer, com muito carinho e admiração, aos meus pais, aos meus irmãos, às minhas queridas sobrinhas, Inês e Daniela, e ao meu cunhado, pelo apoio concedido no desenvolvimento deste trabalho. Um agradecimento também muito especial, ao Marcelino, pelo seu apoio, pelo seu amor, e pelo espaço necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

A nível mundial tem-se observado um elevado número de estruturas de betão degradadas. De modo a que as estruturas idealizadas, projectadas e construídas sejam cada vez mais sustentáveis, do ponto de vista da durabilidade, é necessário implementar durante a fase de projecto, metodologias de controlo de qualidade das estruturas com base em ensaios simples e fiáveis, por exemplo, aplicando o ensaio de resistividade eléctrica, que é um ensaio simples, fácil de realizar e que exige poucos recursos.

O controlo de qualidade do betão, está normalmente associado à verificação da conformidade das características mecânicas e de durabilidade, que geralmente exigem procedimentos de acondicionamento, preparação e condução do ensaio. Com o presente programa experimental pretende-se implementar um procedimento pouco utilizado na prática corrente, no controlo de qualidade do betão com base num ensaio não destrutivo, o ensaio de resistividade eléctrica, de grande fiabilidade e de fácil aplicabilidade, divulgado pela comunidade técnica científica.

Este trabalho pretende divulgar o conhecimento existente na indústria sobre esta técnica de ensaio, com a possibilidade de ser implementada tanto em laboratório como em obra. A metodologia de ensaio, consiste na medição de resistividade eléctrica, para o controlo de qualidade do betão em laboratório, em unidades de pré-fabricação, de betão pronto e na construção em geral. De modo a poder aferir a metodologia que se pretende implementar, moldaram-se provetes cúbicos e cilíndricos, sob diferentes condições de temperatura e humidade controlada, 30 °C, 20 °C e 5 °C em ambiente saturado e 20 °C com 50 % de humidade relativa. No tempo avaliou-se a influência de diferentes condições de cura nas medições da resistividade eléctrica usando diferentes técnicas de ensaio e tipos de corrente. A aplicabilidade desta metodologia em obra, em estruturas de betão armado, mereceu o estudo em lajetas com e sem armadura com dimensões semi-infinitas. Na lajeta sem armadura avaliou-se a influência do rebordo e das condições fronteira na medição da resistividade eléctrica. Na lajeta com armadura aferiu-se a influência da armadura e de diferentes espessuras de recobrimento na medição da resistividade eléctrica, usando a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner), com o tempo.

Resultados experimentais demonstraram que a resistividade eléctrica usando diferentes técnicas de ensaio e diferentes tipos de corrente eléctrica, apresenta uma boa correlação com outros parâmetros de durabilidade e com o parâmetro de resistência mecânica.

Avaliou-se a influência de diferentes condições de cura, humidade e temperatura controlada, nas medições da resistividade eléctrica, com o tempo. Na lajeta de betão com armadura, avaliou-se a influência da presença da armadura e diferentes espessuras de recobrimento nas medições da resistividade eléctrica, ou seja, a presença da armadura faz baixar consideravelmente as medições da resistividade eléctrica, e à medida que a espessura de recobrimento aumenta, diminui a influência da armadura nas medições da resistividade eléctrica. Na lajeta sem armadura observou-se que à medida que nos aproximamos do rebordo aumenta o valor nas medições da resistividade eléctrica.

A resistividade eléctrica demonstra uma boa correlação com os ensaios de natureza mecânica e outros parâmetros indicadores de durabilidade. Deste modo, esta técnica de ensaio é uma excelente ferramenta para controlo de qualidade em obra, e tem a grande vantagem de ser um ensaio não destrutivo. A partir dos resultados obtidos nas primeiras idades, no ensaio de resistividade eléctrica, é possível estimar os parâmetros de resistência mecânica e de resistividade a longo prazo, com uma boa aproximação.

ABSTRACT

There are a significant number of deteriorated concrete structures. So that structures are conceived, designed and built to be more sustainable, from a durability point of view it is necessary to implement during construction methods of quality control based on simple and reliable tests, for example the electrical resistivity test, which is relatively simple, easy to perform and requires few resources.

The quality control of concrete is normally associated with checking the mechanical characteristics and durability, which typically require procedures for preconditioning, preparation and execution of the test. With this experimental program is intended to propose a procedure for the quality control of concrete using a non-destructive testing - electrical resistivity, of high reliability and easy applicability, published by the scientific technical community.

This research aims to disseminate knowledge about this technique for testing that can be implemented both in the laboratory and on site. The test methodology consists in the measurement of electrical resistivity for the quality control of concrete in the laboratory, in units of prefabricated, ready-mix concrete and construction in general. In order to assess the methodology that is intended cubic specimens and cylindrical specimens are stored, under different conditions of temperature and humidity controlled, 30 ° C, 20 ° C and 5 ° C in an environment saturated and 20 ° C with 50% relative humidity. At the time of evaluation the influence of different curing conditions on the electrical resistivity measurements using different techniques and types of test current. Furthermore, this research studied the influence on electrical resistivity measurements of concrete slabs, with and with reinforcement. The slabs are tested for the influence of thickness, reinforcement cover, proximity to the edge and placing with regards to reinforcement geometry. The influences of these aspect s studied over time.

Experimental results showed that the electrical resistivity using different test techniques and different types of electric current show a good correlation with other parameters as the durability and mechanical characteristics. The influence of different curing conditions, humidity and temperature controlled measurements of electrical

resistivity with time was evaluated. In concrete slabs with reinforcement, the influence of the presence of reinforcement and different coating thicknesses in the measurement of electrical resistivity, ie, the presence of the reinforcement is significantly lower electrical resistivity measurements, and as the thickness of coverage increases, the influence of reinforcement on measurements of electrical resistivity was evaluated.

The electrical resistivity shows a good correlation with the mechanical nature of tests and other indicators of durability parameters, thus, this assay technique is an excellent tool for quality control at work, and has the great advantage of being a non-destructive testing. From the results obtained in the early ages when testing electrical resistivity, it is possible to estimate the parameter of mechanical resistance and resistivity in the long term, with a good approximation.

ÍNDICE RESUMIDO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT.....	v
Capítulo I – INTRODUÇÃO.....	1
Capítulo II – A RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DO BETÃO.....	7
Capítulo III – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS, PROCEDIMENTOS E CONDUÇÃO DOS ENSAIOS.....	31
Capítulo IV – APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	77
Capítulo V – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	139
BIBLIOGRAFIA	143
ANEXO A - MATURIDADE	149
ANEXO B - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	153

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
Capítulo I – INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objectivos do trabalho	3
1.3 Metodologia	5
1.4 Organização da dissertação	5
Capítulo II – A RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DO BETÃO	7
2.1 Conceito de Resistividade eléctrica	7
2.1.1 Teoria da resistividade eléctrica no betão	9
2.1.2 Factores que influenciam a resistividade eléctrica do betão	11
2.1.2.1 Temperatura	12
2.1.2.2 Teor de humidade	13
2.1.2.3 Razão água/ligante	14
2.1.2.4 Influência do tipo de ligante	16
2.1.2.5 Tipo de agregado	18
2.1.2.6 Dimensões e geometria de provetes	19
2.1.2.7 Influência das armaduras na medição da resistividade eléctrica	23
2.1.2.8 Relação com parâmetros de durabilidade	27
2.2 Ensaio para medição da resistividade eléctrica	28
2.2.1 Equipamentos para medição da resistividade eléctrica	28
Capítulo III – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS, PROCEDIMENTOS E CONDUÇÃO DOS ENSAIOS	31
3.1 Descrição do plano de ensaios	31
3.2 Caracterização dos materiais	36

3.2.1	Cimento portland	36
3.2.2	Adições	37
3.2.3	Agregados	38
3.2.4	Superplastificante.....	40
3.3	Caracterização de BAC.....	40
3.3.1	Introdução	40
3.3.2	Amassadura e procedimentos de BAC	41
3.3.2.1	Ensaio do BAC no estado fresco.....	42
3.3.2.2	Ensaio de espalhamento	43
3.3.2.3	Ensaio de escoamento no funil em V.....	44
3.3.2.4	Ensaio na caixa em L	46
3.3.2.5	Ensaio de segregação	48
3.3.3	Condições de cura.....	50
3.3.3.1	Cura a 30 °C, ambiente saturado.....	51
3.3.3.2	Cura a 20 °C, 50 % HR	52
3.3.3.3	Cura a 20 °C, ambiente saturado.....	52
3.3.3.4	Cura a 5 °C, ambiente saturado.....	53
3.3.3.5	Lajetas a 20 °C, ambiente saturado	53
3.4	Procedimentos e ensaios realizados	54
3.4.1	Resistividade eléctrica	54
3.4.2	Técnicas dos dois eléctrodos.....	56
	Corrente alternada (CA).....	56
	Corrente contínua (CC).....	57
3.4.2.1	Equipamentos de medição	57
3.4.3	Técnica dos 4-eléctrodos – Sonda Wenner.....	60
3.4.3.1	Metodologia de ensaio – provetes de betão	60
3.4.3.2	Metodologia de ensaio – Lajetas.....	63
3.4.4	Resistência à compressão.....	67
3.4.5	Determinação do coeficiente de migração dos cloretos.....	68
3.4.5.1	Resistividade eléctrica - CTH	75
3.4.5.2	Determinação rápida da permeabilidade do betão aos cloretos	76

Capítulo IV – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	77
4.1 Considerações Gerais.....	77
4.2 Controlo das amassaduras.....	78
4.3 Resultado e análise dos provetes de betão	82
4.3.1 Resistividade eléctrica em provetes de betão.....	82
4.4 Resistência à compressão.....	90
4.5 Maturidade	93
4.6 Resistência à penetração de cloretos.....	94
4.6.1 Ensaio para determinação rápida da permeabilidade do betão aos cloretos	99
4.7 Previsão da resistência mecânica com base no ensaio de resistividade eléctrica	100
4.7.1 Introdução	100
4.7.2 Metodologia	100
4.7.2.1 Regressão hiperbólica linearizada.....	101
4.7.2.2 Modelo do método teórico	104
4.7.2.3 Regressão exponencial.....	107
4.8 Análise de correlação	113
4.9 Resultados e análise das lajetas de betão	116
4.9.1 Lajetas sem armadura – Lajeta A.....	117
4.9.1.1 Influência do bordo	118
4.9.1.2 Influência das dimensões dos provetes	121
4.9.2 Lajeta com armadura – Lajeta B	123
4.9.2.1 Medições realizadas na direcção paralela ao eixo YY.....	124
4.9.2.2 Medições realizadas na direcção paralela ao eixo dos XX.....	129
4.9.2.3 Influência do posicionamento dos eléctrodos sobre a armadura	134
Capítulo V – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	139
5.1 Conclusões	139
5.2 Desenvolvimentos futuros	142
BIBLIOGRAFIA.....	143
ANEXO A - MATURIDADE	149

1.1	Introdução	149
1.2	Evolução da resistência mecânica.....	151
1.3	Energia de activação	152
ANEXO B - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....		153
2.1	Introdução	153
2.2	Objectivos	153
2.3	Estudo preliminar.....	154
2.3.1	Apresentação de resultados.....	154
2.4	Considerações finais	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Metodologia para avaliação de parâmetros de durabilidade e mecânicos.	3
Figura 2.1 – Princípio de funcionamento utilizando a técnica das quatro eléctrodos - Sonda Wenner: a) em solos (Elis, 2011); b) em superfícies de betão (Malhotra <i>et al.</i> , 2004).	8
Figura 2.2 – Representação esquemática da medição de RE pelo método dos dois eléctrodos (Figueiras <i>et al.</i> , 2010).	9
Figura 2.3 – Resistência eléctrica de diversos materiais (Silva, 2005).	11
Figura 2.4 – Efeito do grau de saturação e da razão a/c na resistividade eléctrica do betão (Silva, 2005).	14
Figura 2.5 – Efeito da relação água/ligante na pasta cimentícia avaliada aos 7 dias de idade (Whiting <i>et al.</i> , 2003).	15
Figura 2.6 – Efeito da relação água/ligante na resistividade do betão (Whiting <i>et al.</i> , 2003).	15
Figura 2.7 – Influência da razão água/ligante e do grau de saturação na medição da resistividade eléctrica (Whiting <i>et al.</i> , 2003).	16
Figura 2.8 – Efeito do tipo de cimento na medição da resistividade eléctrica do betão (Whiting <i>et al.</i> , 2003).	17
Figura 2.9 – Efeito do teor de cimento na medição da resistividade eléctrica do betão (Whiting <i>et al.</i> , 2003).	18
Figura 2.10 – Recomendações geométricas para medição da resistividade eléctrica do betão (traduzido e adaptado de (Gowers <i>et al.</i> , 1999b)).	20
Figura 2.11 – Constante de calibração para diferentes provetes (Morris <i>et al.</i> , 1996).	21
Figura 2.12 – Esquema de ensaio adoptado para medição da resistividade eléctrica (traduzido e adaptado de (Sengul <i>et al.</i> , 2008)).	22
Figura 2.13 – Influência das medições na resistividade eléctrica utilizando a Sonda Wenner (traduzido e adaptado de (Sengul <i>et al.</i> , 2008)).	22
Figura 2.14 – Influência da presença de armadura na medição da resistividade eléctrica (Hoppe, 2005).	23
Figura 2.15 – Dimensões das lajes com varão de aço embebido (traduzido e adaptado de (Sengul <i>et al.</i> , 2009)).	24

Figura 2.16 – Configuração do esquema de medição (traduzido e adaptado de (Sengul <i>et al.</i> , 2009)).	24
Figura 2.17 – Influência do afastamento entre os eléctrodos e da direcção na medição da RE (recobrimento: 50 mm), (traduzido e adaptado de (Sengul <i>et al.</i> , 2009).	26
Figura 2.18 – Efeito do recobrimento na medição da resistividade eléctrica utilizando a sonda Wenner (traduzido e adaptado de (Sengul <i>et al.</i> , 2008; Sengul <i>et al.</i> , 2009)).	26
Figura 2.19 – Equipamentos para medição da resistividade e condutividade eléctrica do betão: a) TORRENT – Proceq; b) RM MK II (Proceq) (Minho, 2005).	29
Figura 2.20 – Equipamentos para medição da condutividade eléctrica do betão: a) ; b) barra de referência (INSTRUMENTS, 2009)	29
Figura 3.1 – Distribuição granulométrica, em volume, do cimento CEM I 42.5 R.	37
Figura 3.2 – Distribuição granulométrica, em volume, do filler calcário (Micro 100).	38
Figura 3.3 – Aspecto geral dos agregados utilizados no fabrico do betão – BAC:	38
Figura 3.4 – Distribuição granulométrica dos agregados utilizados no BAC.	39
Figura 3.5 – Fase de adição de $\frac{1}{4}$ da água	42
Figura 3.6 – Fase final de amassadura	42
Figura 3.7 – Geometria do funil.	43
Figura 3.8– Slump - Flow	43
Figura 3.9 – Geometria do Funil a); b) equipamento de ensaio do funil em V.	45
Figura 3.10 – Dimensões da caixa em L–BOX (traduzido e adaptado de (EFCA, 2005)).	46
Figura 3.11 – Aspecto geral do ensaio da caixa em L: a) decurso o ensaio; b) fase em que é possível efectuar as medições (H_1 e H_2).	47
Figura 3.12 – Condições de acondicionamento das espécimes a) película de acetato; b) aplicação de azulejos.	51
Figura 3.13– a) Aspecto geral do tanque utilizada na cura a 30 °C; b) controlo da temperatura.	51
Figura 3.14 – Condições de cura dos provetes curados a 20°C, 50 % HR:	52
Figura 3.15 – a) Condições de cura a 20 °C e ambiente saturado; b) controlador da câmara de cura.	52
Figura 3.16 – Condições de cura dos provetes curados a 5 °C; a) interior da câmara; b) controlador da câmara Walk-In.	53

Figura 3.17 – Aspecto geral das lajes: no interior da câmara a);	54
Figura 3.18 – Esquema de ensaio da RE usando a técnica dos 2-eléctrodos.	55
Figura 3.19 – Medição da RE usando a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner).	55
Figura 3.20 – Forma da onda em corrente alternada (CA).	56
Figura 3.21 – Forma da onda em corrente contínua (CC).	57
Figura 3.22 – Gerador de sinal em corrente alternada (CA).	58
Figura 3.23 – Unidade de Corrente contínua (CC).	58
Figura 3.24 – Pormenor dos multímetros utilizados na monitorização da resistividade eléctrica.	58
Figura 3.25 – Medição em corrente contínua (CC); a) intensidade de corrente (Amps); b) tensão aplicada (Volts).	59
Figura 3.26 – Equipamento para medição da RE – Sonda Wenner	60
Figura 3.27 – Régua de calibração da Sonda Wenner	60
Figura 3.28 - Representação esquemática da medição da ER usando a Sonda Wenner: em provetes cúbicos a); b) provetes cilíndricos.	61
Figura 3.29 – Esquema geral do ensaio usando a técnica dos dois eléctrodos; a) provetes cúbicos; b) provetes cilíndricos.	62
Figura 3.30 – Medição da resistividade eléctrica com a técnica dos quatro pontos, em provetes cúbicos (esquerda) e em provetes cilíndricos (direita).	63
Figura 3.31 – Procedimento de medição da Resistividade eléctrica em elementos de betão armado.	64
Figura 3.32 – Representação esquemática da lajeta sem armadura (Lajeta A).	65
Figura 3.33 – Aspecto geral da cofragem para o lajeta A a); pormenor da laje betonada b).	65
Figura 3.34 – Representação esquemática das dimensões do Lajeta B.	66
Figura 3.35 – Pormenores das armaduras do Lajeta B a); fase de enchimento b).	67
Figura 3.36 – Lajeta B com as dimensões esquematizadas.	67
Figura 3.37 – Prensa Universal MTS: a) condução de um ensaio à compressão;	68
Figura 3.38 – Aspecto geral dos provetes moldados e acondicionamento até às 24 horas.	69
Figura 3.39 – Aspecto geral dos provetes antes da colocação no sistema de vácuo a);	70
Figura 3.40 – Colocação da solução anódica (NaOH).	70
Figura 3.41 – Representação esquemática do set-up de ensaio	71

Figura 3.42 – Esquema geral do ensaio a); b) pormenor do sistema de instrumentação das amostras.	73
Figura 3.43 – Representação esquemática da metodologia de medição (traduzido e adaptado de (nordtest method, 1991-11)).	73
Figura 4.1 – Evolução da resistividade eléctrica (CA) em diferentes ambientes: a) provetes cúbicos (esquerda); b) provetes cilíndricos.	85
Figura 4.2 – Evolução da resistividade eléctrica (CC) em diferentes ambientes:	85
Figura 4.3 - Evolução da resistividade eléctrica (Sonda Wenner):.....	86
Figura 4.4 - Evolução da RE de provetes curados em ambiente saturado a 30 °C: a) provetes cúbicos; b) provetes cilíndricos.	87
Figura 4.5 - Evolução da RE de provetes curados a 20 °C e 50 % HR: a) provetes cúbicos; b) provetes cilíndricos.	88
Figura 4.6 - Evolução da RE de provetes curados a 20 °C e ambiente saturado:	88
Figura 4.7 - Evolução da RE de provetes curados a 5 °C e ambiente saturado:	89
Figura 4.8 – Correlação obtida nas medições de RE através da sonda Wenner e o método dos 2-eléctrodos: a) para provetes cúbicos; b) provetes cilíndricos.	90
Figura 4.9 – Diagrama tensão / idade observada em cada uma das condições de cura estudadas.	92
Figura 4.10 – Diagramas Tensão / Extensão obtidos aos 29 dias de idade:	92
Figura 4.11 – Evolução da resistência mecânica, à idade do ensaio e idade equivalente.	94
Figura 4.12 – Avaliação da Profundidade de penetração dos cloretos.	97
Figura 4.13 – Evolução da RE e da temperatura ao longo do ensaio CTH, 30 °C e ambiente saturado.	98
Figura 4.14 – Evolução da RE e da temperatura ao longo do ensaio CTH, 20 °C e 50 % HR.....	98
Figura 4.15 - Evolução da RE e da temperatura ao longo do ensaio CTH, 20 °C e ambiente saturado.	98
Figura 4.16 - RE e temperatura ao longo do ensaio CTH, 5 °C, Saturado.....	98
Figura 4.17 – Correlação entre a resistência mecânica à compressão e a resistividade eléctrica com base no método teórico: a) 30 °C, Saturado; b) 20 °C, 50% HR; c) 20 °C, Saturado; d) 5 °C, Saturado.....	102
Figura 4.18 – Ajuste da recta às medições de RE obtidas até aos 8 dias de idade: ...	103

Figura 4.19 – Resultados experimentais e previsão numérica da RE - 29 dias de idade:	110
Figura 4.20 – Resultados experimentais e previsão numérica da RE – 91 dias:	111
Figura 4.21 – Resultados numéricos e experimentais aos 29 dias de idade.	112
Figura 4.22 – Resultados numéricos e experimentais - 91 dias de idade:	112
Figura 4.23 – Aferição do equipamento na câmara de condicionamento.	116
Figura 4.24 – Secções de medição da RE na lajeta sem armadura (lajeta A).	117
Figura 4.25 – Avaliação da RE na lajeta sem armadura.	117
Figura 4.26 – Evolução da resistividade eléctrica no modelo de laje sem armadura – espessura de laje de 150 mm.	118
Figura 4.27 – Evolução da resistividade eléctrica no modelo de laje sem armadura – espessura de laje de 200 mm.	119
Figura 4.28 – Evolução da resistividade eléctrica no modelo de laje sem armadura – espessura de laje de 150 mm.	119
Figura 4.29 – Evolução da resistividade eléctrica no modelo de laje sem armadura – espessura de laje de 200 mm.	120
Figura 4.30 – Influência das dimensões das amostras na medição RE – Sonda Wenner.	121
Figura 4.31 – Correlação entre a técnica dos 2-electrodos e a técnica dos 4-electrodos (Sonda Wenner) – provetes cúbicos.	123
Figura 4.32 – Representação esquemática da espessura de recobrimento.	124
Figura 4.33 – Representação esquemática da espessura de recobrimento.	124
Figura 4.34 – Avaliação da RE ao longo do tempo – direcção YY, e = 35 mm.	125
Figura 4.35 – Avaliação da RE ao longo do tempo – direcção YY, e = 165 mm.	125
Figura 4.36 – RE versus distância ao bordo – direcção YY, e = 35 mm.	126
Figura 4.37 – RE versus distância ao bordo – direcção YY, e = 165 mm.	126
Figura 4.38 – Influência das espessuras de recobrimento comparativamente com o modelos sem armadura na medição da RE aos 7 dias de idade.	129
Figura 4.39 – Influência das espessuras de recobrimento (Lajeta B) comparativamente com o lajeta sem armadura (Lajeta A) na medição da RE aos 151 dias de idade.	129
Figura 4.40 – Representação da espessura de recobrimento (paralela ao eixo dos XX).	130
Figura 4.41 – Evolução da RE ao longo do tempo na lajeta B (e = 50 mm).	130
Figura 4.42 - Evolução da RE ao longo do tempo na Lajeta B (e = 150 mm).	131

Figura 4.43 – Evolução da RE ao longo do tempo na lajeta B ($e = 50$ mm).	131
Figura 4.44 - Evolução da RE ao longo do tempo na Lajeta B ($e = 150$ mm).	132
Figura 4.45 – Influência das espessuras de recobrimento na medição da RE avaliada aos 7 dias de idade.	133
Figura 4.46 – Influência das espessuras de recobrimento na medição da RE avaliada aos 151 dias de idade.	133
Figura 4.47 – Representação esquemática das medições de RE na lajeta B.	134
Figura 4.48 – Medições da RE na face de menor recobrimento.	134
Figura 4.49 – Medições da RE na face de maior recobrimento.	135
Figura 4.50 – Evolução da resistividade eléctrica com o tempo (menor recobrimento – 35 mm).	135
Figura 4.51 – Evolução da RE com o tempo (maior recobrimento – 165 mm).	136
Figura 4.52 – Influência da localização dos eléctrodos na medição da RE (menor recobrimento).	136
Figura 4.53 – Influência da localização dos eléctrodos na medição da RE (maior recobrimento).	137

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Absorção de água e resistividade eléctrica de diferentes agregados.....	18
Tabela 2.2 – Condições fronteira optimizadas para avaliação da resistividade eléctrica (Gowers <i>et al.</i> , 1999b).....	20
Tabela 2.3 – Características dos equipamentos	29
Tabela 3.1 – Caracterização química, física e mecânica do cimento CEM I 42.5 R..	36
Tabela 3.2 - Caracterização química, física do filler calcário da Comital	37
Tabela 3.3 – Distribuição granulométrica dos agregados.....	39
Tabela 3.4 – Propriedades do Superplastificante ViscoCrete 3006 – SIKA.....	40
Tabela 3.5 – Composição de Betão auto-compactável	41
Tabela 3.6 – Resultados médios obtidos no ensaio de espalhamento (Slump Test)....	44
Tabela 3.7 – Resultados obtidos no ensaio do funil em V	45
Tabela 3.8 – Resultados dos ensaios da caixa em L	48
Tabela 3.9 – Resistência à Segregação do BAC	49
Tabela 3.10 – Caracterização do betão no estado fresco - BAC.....	50
Tabela 3.11 – Principais características dos Voltímetros - KEITHLEY	59
Tabela 3.12 – Diferença de potencial e duração do ensaio de migração	72
Tabela 3.13 – Penetração dos iões de cloro através da carga passada (Whiting <i>et al.</i> , 2003)	76
 Tabela 4.1 – Controlo de amassaduras efectuado às 24 horas – provetes moldados...	79
Tabela 4.2 – Controlo de amassaduras efectuado às 24 horas – lajetas (A e B).....	79
Tabela 4.3 – Controlo de amassaduras efectuado às 24 horas – provetes moldados...	80
Tabela 4.4 – Lajetas - Controlo de amassaduras efectuado às 24 horas (provetes)....	80
Tabela 4.5 – Probabilidade ao afastamento máximo entre $F^*(x)$ e $F(x)$ devido aos factores aleatórios seja não inferior ao valor observado	81
Tabela 4.6 – Evolução da resistividade eléctrica com o tempo - provetes cúbicos	83
Tabela 4.7 – Evolução da Resistividade Eléctrica avaliada em provetes cilíndricos ..	84
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaio à compressão simples de provetes cúbicos.....	91
Tabela 4.9 – Idade equivalente para cura a 30 °C e $T_{ref.} = 20$ °C	93
Tabela 4.10 – Idade equivalente para cura a 5 °C e $T_{ref.} = 20$ °C	93
Tabela 4.11 – Avaliação da resistividade eléctrica através do ensaio de difusão.....	95
Tabela 4.12 – Diferença de potencial e duração do ensaio de migração	96

Tabela 4.13 – Profundidade média de penetração dos cloretos	96
Tabela 4.14 – Coeficiente de difusão do ião cloro.....	97
Tabela 4.15 – Resistência à permeabilidade do betão aos iões de cloreto.....	99
Tabela 4.16 – Variáveis da equação para previsão da resistência mecânica aos 29 dias de idade com base na RE	103
Tabela 4.17 – Variáveis da equação para previsão da resistividade eléctrica aos 29 e 91 dias de idade.....	105
Tabela 4.18 – Variáveis da equação para previsão da resistência mecânica aos 29 e 91 dias de idade.....	106
Tabela 4.19 – Variáveis da equação para previsão da resistividade eléctrica aos 29 e 91 dias de idade.....	108
Tabela 4.20 – Variáveis da equação para previsão da resistência mecânica aos 29 e 91 dias de idade.....	108
Tabela 4.21 – Coeficientes de Correlação () – 30 °C, Saturado.....	114
Tabela 4.22 – Coeficientes de Correlação () – 20 °C, 50 % HR.....	114
Tabela 4.23 – Coeficientes de Correlação () – 20 °C, Saturado.....	115
Tabela 4.24 – Coeficientes de Correlação () – 5 °C, Saturado.....	115
Tabela 4.25 – Variação média observada nas medições da RE	121

Capítulo I – INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A nível mundial tem-se observado um elevado número de estruturas de betão armado degradadas. Como exemplo, refira-se que nos Estados Unidos da América, na década de 1990, cerca de metade das 57.500 pontes encontram-se afectadas pela corrosão. Estima-se que o orçamento destinado para a reparação das pontes degradadas ascenda a 50 biliões de dólares (Ferreira, 2000).

Segundo a definição de durabilidade de uma estrutura, apresentada na Especificação do LNEC 465, trata-se da capacidade de um dado elemento estrutural permanecer apto para o período de vida útil para que a estrutura foi projectada, estando sujeita a adequada manutenção.

Um projecto de estruturas de betão armado só recentemente começou por considerar a agressividade do meio ambiente e a ter em linha de conta a análise da durabilidade. Antigamente, esta era considerada indirectamente, de forma prescritiva, e sem qualquer forma de realizar uma verificação. Esta abordagem não quantifica o desempenho de durabilidade de betão e foi demonstrado que, em algumas situações, não garantia a vida útil da estrutura (Ferreira *et al.*, 2008).

Segundo os autores (Ferreira *et al.*, 2008), a inexistência de informação específica sobre a durabilidade do betão faz com que seja difícil avaliar a sua qualidade e desempenho. Para determinado ambiente, sem conhecimento prévio do desempenho da durabilidade de betão, as soluções de projecto dificilmente poderão ser optimizadas.

O conceito associado à manutenção de estruturas consistia em inspecções periódicas, mas novos métodos de instrumentação e monitorização de estruturas tem emergido podendo já ter um considerável grau de automação e controlo. A utilização de sensores de embeber no betão para monitorizar a durabilidade de estruturas começa a propagar-se, no entanto, ainda com algumas incertezas no que diz respeito à interpretação de resultados e à eficácia da sua utilização (Figueiras *et al.*, 2008).

Nos últimos tempos, tem-se verificado um desenvolvimento de programas de cálculo que traduzem a vida útil das estruturas de betão armado, de modo a poder prever o mecanismo de cada uma das acções envolvidas no processo físico de deterioração do betão, sendo necessário desenvolver ferramentas de cálculo que traduzam estes mecanismos de degradação.

Uma máquina de ensaio à compressão, consome obrigatoriamente energia, por vezes muito elevada, devido à capacidade da máquina, e geralmente ao consumo de água, necessária para o sistema de refrigeração do sistema hidráulico, ou seja, existem à priori dois recursos que podem ser minimizados, se a partir do ensaio de resistividade eléctrica for possível estimar a resistência mecânica à compressão com exactidão. Uma outra abordagem sustentável, é a necessidade de conduzir os resíduos de betão para um sistema de tratamento, e ter em linha de conta o custo de transporte e o tratamento destes resíduos em unidades especializadas.

O ensaio destrutivo mais clássico para avaliação da resistência mecânica é o ensaio de compressão, que geralmente é realizado em provetes com dimensões normalizadas, geralmente, aos 28 dias de idade. De modo a poder acompanhar o ritmo acelerado da construção, provetes são ensaiados nas primeiras idades, de modo a poder estimar a tensão de rotura aos 28 dias de idade. A influência do ambiente sobre a cura e maturidade do betão da estrutura, geralmente não é considerada. Na tentativa de melhorar a qualidade de construção e de durabilidade das estruturas, tem sido desenvolvido nos últimos anos, a implementação de novas técnicas para o controlo de qualidade do betão durante a fase de construção e de exploração, com base no ensaio de resistividade eléctrica. A Figura 1.1, ilustra a metodologia a adoptar tanto em laboratório como no local de construção, para avaliação da resistência mecânica com base no ensaio de resistividade eléctrica.

Definida uma determinada classe de betão, e após a verificação em laboratório do cumprimento das exigências de resistência e de durabilidade, usar o ensaio de resistividade eléctrica como instrumento de apoio na tomada de decisão no que diz respeito, por exemplo, à aplicação de pré-esforço em elementos de betão armado.

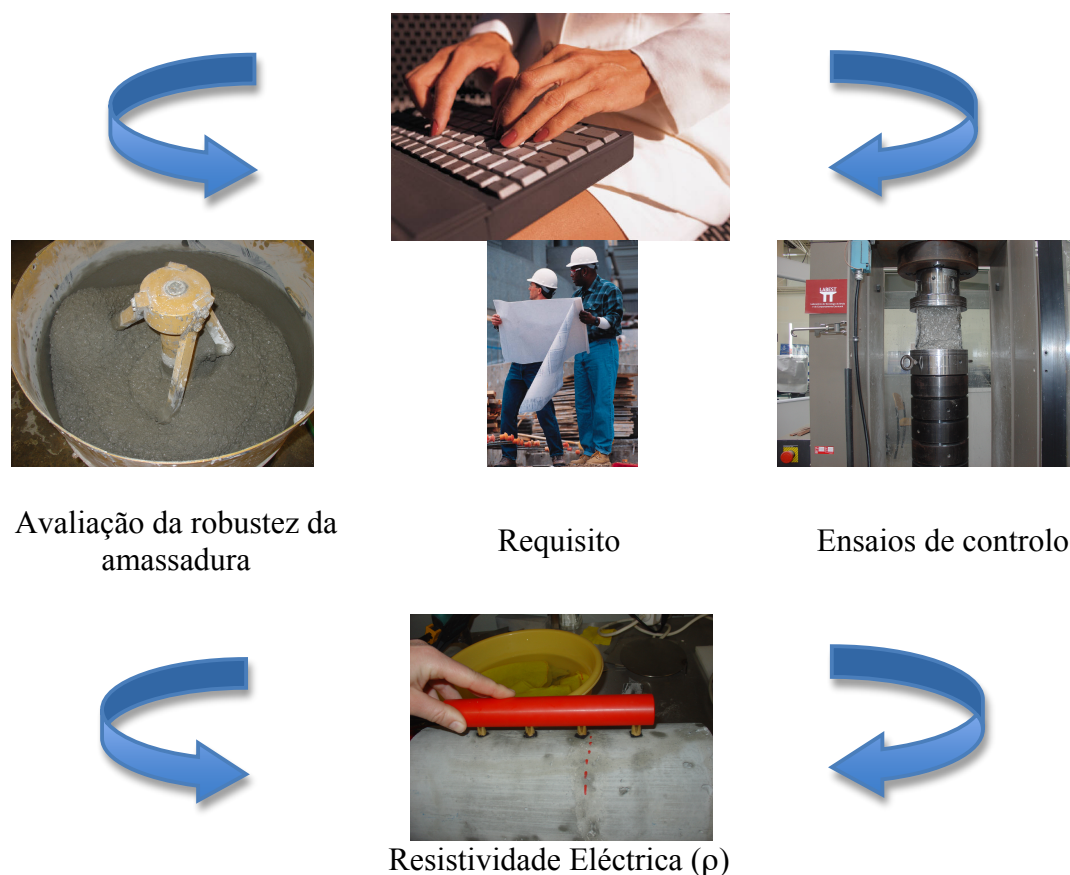


Figura 1.1 – Metodologia para avaliação de parâmetros de durabilidade e mecânicos.

1.2 Objectivos do trabalho

O presente trabalho teve como objectivos principais o estudo da resistividade eléctrica e a sua aplicabilidade no controlo de qualidade do betão, sob o efeito de diferentes condições de cura. A resistividade eléctrica como técnica de ensaio é relativamente recente, a revisão do estado actual do conhecimento desenvolvida por alguns autores Portugueses e Estrangeiros foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Relativamente à parte experimental, pretende-se aplicar e analisar no tempo diferentes métodos de ensaio e diferentes tipos de corrente eléctrica para medição da resistividade eléctrica, nomeadamente, a técnica dos 2-eléctrodos, em corrente alternada e corrente contínua, e a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner), em diferentes amostras normalizadas, provetes cúbicos e cilíndricos.

Moldar amostras com dimensões normalizadas, com o objectivo de avaliar a medição da resistividade eléctrica, em diferentes condições de cura, humidade e temperatura controlada, e aferir os parâmetros de resistência mecânica e de durabilidade, no tempo.

Para as diferentes condições de cura em ambiente controlado, pretende-se estudar a evolução no tempo da resistividade eléctrica, da resistência mecânica à compressão e a resistência à penetração dos cloretos.

De modo a poder avaliar e quantificar a influência das armaduras nos elementos de betão e a influência das condições fronteira nas medições da resistividade eléctrica, pretende-se moldar lajetas de betão com e sem armadura com dimensões semi-infinitas. Na lajeta sem armadura pretende-se estudar a influência do rebordo e diferentes espessuras de laje nas medições de resistividade eléctrica com o tempo. Na lajeta com armadura, avaliar a influência da armadura e de diferentes espessuras de recobrimento nas medições da resistividade eléctrica, com o tempo.

Apresentar uma metodologia de ensaio, para estimar a resistência mecânica aos 28 e 90 dias de idade, com base no ensaio de resistividade eléctrica obtido nas primeiras idades, recorrendo a regressões do tipo linear e de regressão não linear é outro dos objectivos do presente trabalho. Com os resultados obtidos experimentalmente pretende-se divulgar esta metodologia de ensaio para as unidades de pré-fabricação, unidades de betão pronto e para a construção em geral.

1.3 Metodologia

De modo a alcançar os objectivos supra mencionados, foram realizadas cinco amassaduras de aproximadamente 100 L de betão fresco. Devido à capacidade máxima da misturadora de betão (\approx 80 L de betão fresco), realizaram-se duas amassaduras de 50 L, ou seja, cada amassadura caracteriza duas misturas, designadas por: A, B, C, D e E.

As amassaduras designadas por A, B, C, D, tiveram por objectivo a betonagem de provetes cúbicos e cilíndricos e a amassadura E, teve por objectivo o enchimento de lajetas com e sem armadura.

As amostras moldadas nas amassaduras A, B, C, D, foram colocadas em diferentes condições de cura, 30 °C e ambiente saturado, 20 °C e 50 % de humidade relativa, 20 °C e 5 °C, em ambiente saturado, respectivamente. O objectivo de colocar amostras em diferentes condições de cura, foi avaliar a influência da humidade e temperatura controlada nas medições da resistividade eléctrica, e aferir parâmetros de resistência mecânica e de durabilidade.

Com a amassadura E betonaram-se duas lajetas de betão, com e sem armadura. O modelo sem armadura (Lajeta A), com dimensões semi-infinitas, teve por objectivo avaliar as condições fronteira nas medições da resistividade eléctrica, e a lajeta com armadura (Lajeta B), destinou-se a aferir a influência da armadura e espessuras de recobrimento nas medições da resistividade eléctrica, com o tempo.

1.4 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada da seguinte forma.

No CAPÍTULO 1, faz-se a apresentação dos objectivos e estrutura seguida na presente dissertação.

No CAPÍTULO 2, apresenta-se a evolução do conhecimento sobre a resistividade eléctrica, destacando os diversos factores que influenciam a resistividade eléctrica.

No CAPÍTULO 3, apresenta-se a caracterização dos materiais, a metodologia de ensaio para caracterização do betão auto-compactável no estado fresco. Apresentam-se os procedimentos e a metodologia desenvolvida no presente trabalho.

No CAPÍTULO 4, apresentam-se os resultados obtidos no decurso do programa experimental, obtidos em provetes de betão com dimensões standard e em lajetas de betão com e sem armadura, e, finalmente, métodos teóricos de previsão da resistência mecânica aos 29 e 91 dias de idade, com base nos resultados obtidos experimentalmente nas primeiras idades.

No CAPÍTULO 5 apresentam-se as considerações finais, e as questões de maior relevância a abordar em desenvolvimentos futuros.

Capítulo II – A RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DO BETÃO

2.1 Conceito de Resistividade eléctrica

A resistividade eléctrica do betão pode ser medida de diversos modos (Polder *et al.*, 2000). A técnica de medição de resistividade eléctrica foi inicialmente desenvolvida por geólogos, utilizando o método clássico dos quatros eléctrodos, sistema descrito por Wenner, para avaliação da resistividade eléctrica em solos, como se ilustra na Figura 2.1 a), de acordo com a ASTM G573 – Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four – Electrode method. Posteriormente, esta técnica foi adoptada para o betão (Figura 2.1 b)), para avaliação da resistividade eléctrica em laboratório e em estruturas *in-situ*.

Para o cálculo da resistividade eléctrica aparente (ρ_a) usando a Sonda Wenner (4-eléctrodos) são aplicadas as seguintes expressões:

$$\rho = k \times R_e \Leftrightarrow k = 2 \times \pi \times a \Leftrightarrow R_e = \frac{V}{I} \quad [2.1]$$

em que:

ρ - é a resistividade eléctrica em $k\Omega cm$;

k - é uma constante geométrica da célula em cm;

R_e - é a resistência eléctrica do betão em $k\Omega$;

I - é a intensidade eléctrica que passa no circuito em mA;

V - diferença de potencial em Volts e

a - distância entre os eléctrodos.

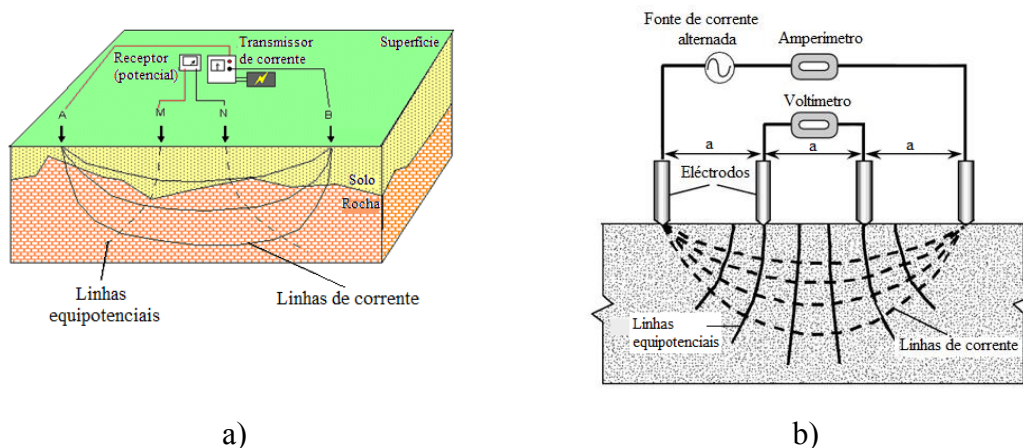


Figura 2.1 – Princípio de funcionamento utilizando a técnica das quatro eléctrodos - Sonda Wenner: a) em solos (Elis, 2011); b) em superfícies de betão (Malhotra *et al.*, 2004).

Adicionalmente, foram desenvolvidas e adaptadas outras técnicas para a medição da resistividade eléctrica, como a técnica dos dois eléctrodos. Esta técnica utiliza dois eléctrodos colocados em contacto com a superfície do betão ou embebidos no seu interior, aplicando uma corrente eléctrica e medindo a diferença de potencial. Aplicando a lei de Ohm, como se apresenta na expressão [2.2], que relaciona a intensidade aplicada com a diferença de potencial medido, obtemos a resistência eléctrica. A resistividade eléctrica é obtida multiplicando a resistência por uma constante geométrica que depende da secção recta (amostra ensaiada e do eléctrodo utilizado) e do comprimento unitário.

$$R = \frac{V}{I} \Leftrightarrow R = \rho * \frac{L}{A} \Leftrightarrow \rho = \frac{V}{I} * \frac{A}{L} \quad [2.2]$$

em que:

R – resistência eléctrica (Ω);

I – intensidade de corrente (A);

V – diferença de potencial (V);

ρ - resistividade eléctrica ($\Omega.m$);

A – área do eléctrodo que esteve em contacto com o espécime e

L – distancia entre os eléctrodos (m).

Na Figura 2.2 ilustra-se o esquema de ensaio para a medição da resistividade eléctrica usando a técnica dos 2-eléctrodos.

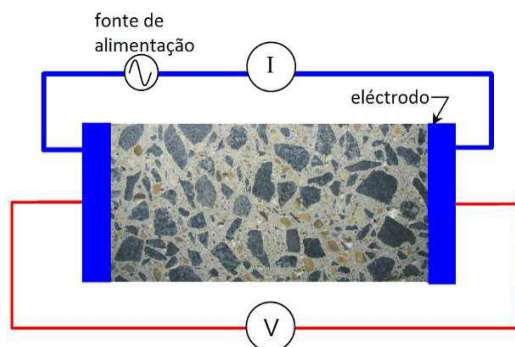


Figura 2.2 – Representação esquemática da medição de RE pelo método dos dois eléctrodos (Figueiras *et al.*, 2010).

2.1.1 Teoria da resistividade eléctrica no betão

Existem basicamente duas teorias para explicar a resistividade eléctrica do betão, e como é efectuado o transporte da corrente dentro da massa do betão: formulações puramente teóricas e formulações baseadas em dados laboratoriais (Silva, 2005).

A primeira baseia-se na teoria dos materiais compósitos. Portanto, é independente da natureza física do betão. A presente teoria pretende prever a resistividade eléctrica do material como um parâmetro função de cada um dos elementos presentes no betão, as suas dosagens e proporções, e até em formulações mais elaboradas, a forma e tamanho dos constituintes (Silva, 2005). Em Silva (2005) é apresentada a equação [2.3] de previsão da condutividade eléctrica de um material compósito, proposta por Maxwell.

$$\frac{\frac{\rho_m - 1}{\rho_m + 2}}{\frac{\rho_a - 1}{\rho_a + 2}} = V_a \times \frac{\rho_m - 1}{\rho_a - 1} \quad [2.3]$$

em que:

ρ_m - é a resistividade eléctrica da matriz;

ρ - é a resistividade eléctrica do material compósito;

ρ_a - é a resistividade eléctrica das partículas e

V_a - é a fracção de volume das partículas.

A resistividade eléctrica dos materiais apresenta uma vasta gama de valores, (Silva (2005), a partir de Keller (1982)), como se ilustra na Figura 2.3. A maioria das especificações apontam para a utilização no betão de agregados duros e com baixo teor de absorção. A resistividade eléctrica destes materiais é da ordem dos $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$.

Para a matriz cimentícia, tomam-se valores da ordem de grandeza dos $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ ou até valores mais baixos. Na prática, é geralmente utilizada a resistividade eléctrica dos agregados como infinita quando comparada com a da matriz, expressando-se V_a por $1 - V_m$, onde V_m é a fracção de volume da matriz, então a equação [2.3], fica reduzida do seguinte modo (equação [2.4]):

$$\rho = \rho_m \frac{3 - V_m}{2V_m} \quad [2.4]$$

De acordo com Maxwell, a fracção de volume de agregados é tão pequena que não existem linhas de corrente em volta das superfícies, e que as partículas são esféricas Silva, 2005 .

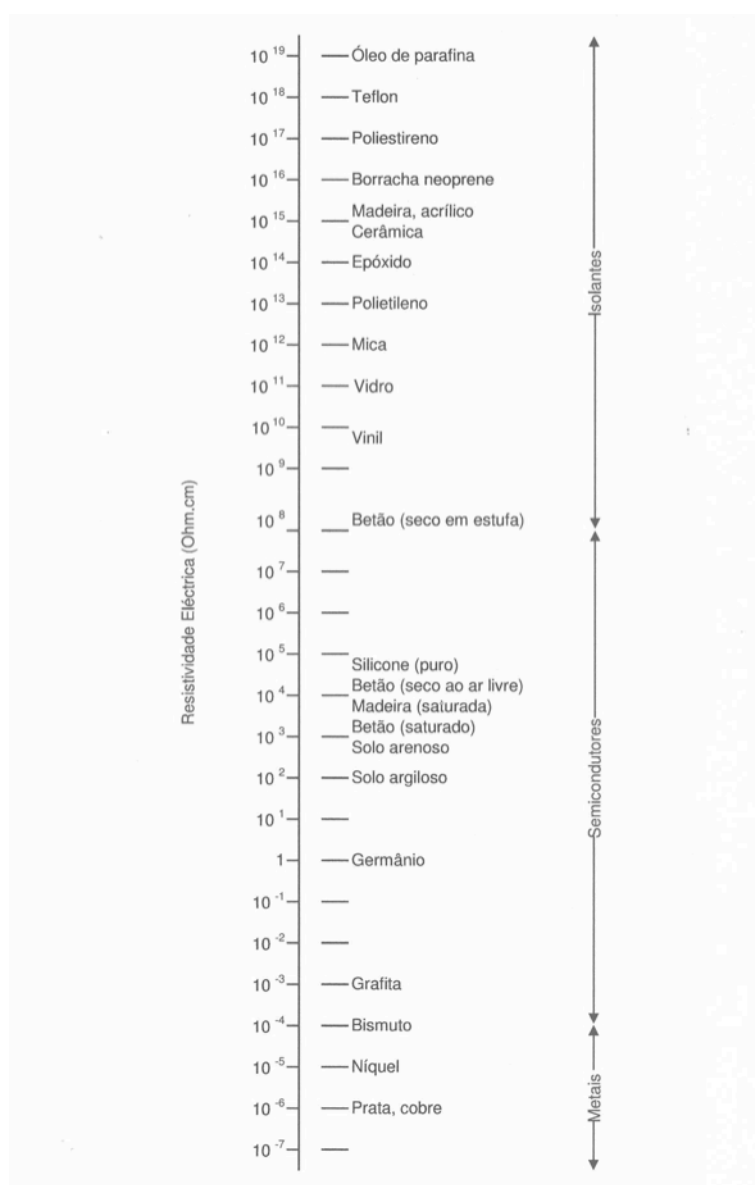


Figura 2.3 – Resistência eléctrica de diversos materiais (Silva, 2005).

2.1.2 Factores que influenciam a resistividade eléctrica do betão

São vários os factores que influenciam a resistividade eléctrica (RE) do betão. Na estrutura porosa, a solução intersticial é responsável por grande parte do transporte da corrente eléctrica. Os factores que influenciam a rede porosa são o tipo e dosagem do ligante, a razão água/ligante e a natureza electroquímica da solução intersticial.

No caso de um betão húmido, com mais poros, bem como maior ou menor tortuosidade da rede porosa causam uma resistividade mais baixa. Para uma humidade relativa constante e em condições estacionárias, a resistividade aumenta para uma menor relação água cimento, e evolui com o tempo, evolução das reacções de hidratação ou pela adição de minerais reactivos, como as escórias de alto forno, cinzas

volantes e sílica de fumo. De salientar que, quase todos os factores estão interligados entre si.

2.1.2.1 Temperatura

A temperatura desempenha um papel fundamental na resistividade eléctrica do betão. A resistividade eléctrica do betão é em grande parte resultado da fase líquida presente nos poros do betão. À medida que a temperatura aumenta (para uma humidade relativa constante), diminui a viscosidade do fluído, aumentando a mobilidade dos iões que transportam a corrente, conduzindo a uma diminuição da resistividade eléctrica do material.

Esta relação pode ser expressa pela Lei de Rasch e Hinrichsen (Silva, 2005) recorrendo à seguinte expressão [2.5]:

$$R_2 = R_1 \times e^{\frac{A}{T_2} - \frac{A}{T_1}} \quad [2.5]$$

em que:

R_1 – é a resistividade à temperatura T_1 ;

R_2 – é a resistividade à temperatura T_2 ;

T_1, T_2 – são as temperaturas em Kelvin;

A – é uma constante.

A equação de Arrhenius, apresentada por Polder *et al.* (2000) descreve o efeito da temperatura na condutividade eléctrica e pode ser apresentada do seguinte modo (equação [2.6]):

$$\sigma(T_i) = \sigma(T_0) \times \exp\left(b\left[T_0^{-1} - T_i^{-1}\right]\right) \quad [2.6]$$

em que:

σ - é a condutividade [$1/\Omega.m$];

T_0 - é a temperatura de referência [K];

T_i - é a temperatura actual [K] e

b - factor empírico [k].

Para as condições em regime estacionário b , assume valores no intervalo de 1500 a 4500, e:

- aumenta com a diminuição da humidade relativa para uma determinada pasta, argamassa ou betão;
- diminui com a relação água/ligante da mistura e para uma determinada humidade relativa;
- a influência da temperatura na condutividade do conjunto, difere significativamente da pasta ou argamassa para a mesma concentração de iões presentes nos poros. Este fenómeno é devido a uma forte interacção ião - sólido.

A dependência da humidade no factor b , no caso da pasta ou do betão pode ser explicada pelo facto de ao baixar a humidade relativa da solução dos poros torna-se mais concentrada a solução intersticial que está presente nos canais mais apertados dos poros, e por isso a área da superfície das paredes aumenta e, consequentemente, o grau de interacção entre os iões e sólidos. Estas interacções podem variar com o tipo de cimento com diferentes composições químicas (escórias, cinzas volantes, cimento). Deste modo, será necessário ajustes de correcção, dado que a resistividade é muito afectada pela temperatura. Simplificando, no intervalo de 0° a 40 °C, ocorre duplicação de resistividade eléctrica para uma diminuição de 20 °C, ou uma mudança de 3% a 5% por cada grau (Polder *et al.*, 2000).

2.1.2.2 Teor de humidade

À medida que a humidade do betão diminui, diminui a quantidade de água presente nos poros que transporta a corrente, aumentando deste modo a resistividade. Hunkeler (1996) verificou que a condutividade eléctrica do betão anula-se para uma humidade relativa próxima de 40%. Embora a matriz cimentícia ainda contenha bastante água para uma esta humidade relativa, aquela retida nos poros acaba por ter um comportamento não condutor. Este comportamento deve-se, fundamentalmente, às tensões superficiais que tornam imóveis os iões dissolvidos nos poros. À medida que aumenta o grau de saturação, a resistividade eléctrica diminui. Essa tendência também se observa quando aumenta a razão água / cimento, como se observa na Figura 2.4.

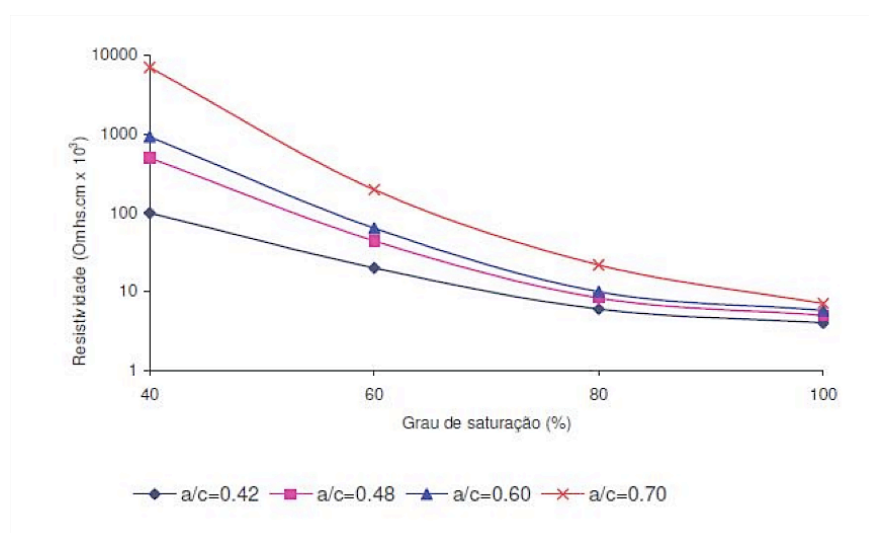


Figura 2.4 – Efeito do grau de saturação e da razão a/c na resistividade eléctrica do betão (Silva, 2005).

2.1.2.3 Razão água/ligante

A razão água/ligante é um dos mais importantes parâmetros de qualidade do betão, porque afecta as suas características mecânicas e de durabilidade. A relação água/ligante desempenha um papel fundamental na microestrutura da pasta de cimento, e na concentração iónica da solução dos poros. Devido a estes efeitos, a resistividade eléctrica do betão é influenciada pela razão água/ligante (Whiting *et al.*, 2003).

Whiting *et al.*(2003), a partir de um estudo desenvolvido por Monfore (1968), que estudaram a relação água/ligante e a resistividade eléctrica na pasta de cimento, observaram que, a resistividade eléctrica da pasta cimentícia aumenta à medida que diminui a relação água/ligante. O valor da resistividade eléctrica da pasta de cimento com a relação água/ligante de 0.4 foi de aproximadamente o dobro da pasta com uma relação água/ligante de 0.6. A Figura 2.5 mostra a tendência da diminuição de resistividade eléctrica com o aumento da relação água/ligante para dois tipos de cimento. De salientar que, a resistividade da pasta cimentícia é muito menor comparativamente com a do betão, realizada com a mesma pasta.

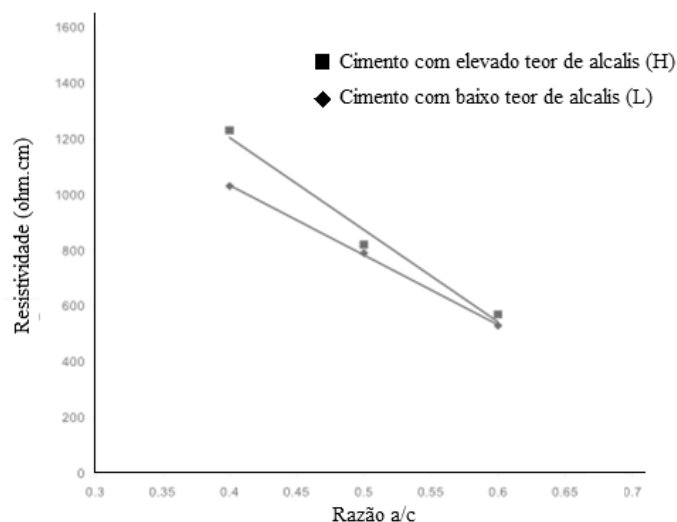


Figura 2.5 – Efeito da relação água/ligante na pasta cimentícia avaliada aos 7 dias de idade (Whiting *et al.*, 2003).

Os efeitos da relação água/ligante na resistividade eléctrica do betão foram estudados por Hughes (1985), cujos resultados estão apresentadas na Figura 2.6. Estes estudos foram realizados em betões com 28 dias de idade. A partir do gráfico da Figura 2.6, constata-se que para um teor de cimento de 400 kg/m^3 , a resistividade eléctrica diminui quase 50 % quando a relação água/ligante aumenta de 0.40 para 0.55.

É possível constatar-se ainda que para uma composição de betão de 350 kg/m^3 , a resistividade eléctrica diminui de cerca de $5.9 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ para $3.7 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ quando a razão água/ligante aumenta de 0.45 para 0.60.

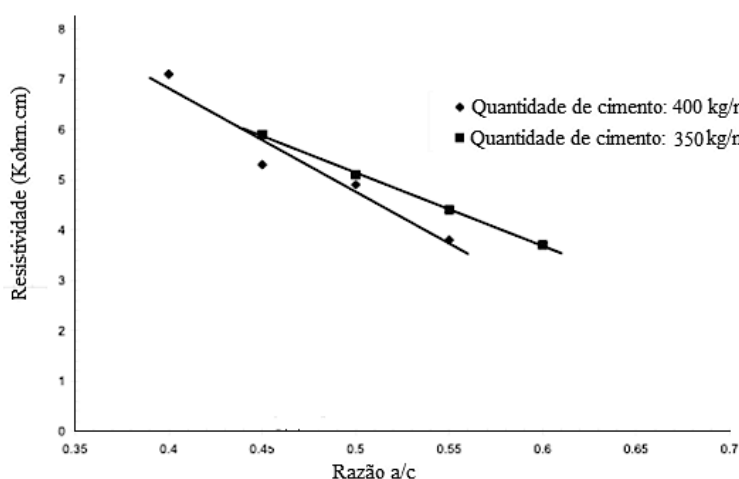


Figura 2.6 – Efeito da relação água/ligante na resistividade do betão (Whiting *et al.*, 2003).

A influência da razão água/ligante na resistividade eléctrica do betão varia com o grau de saturação. O efeito do grau de saturação é menos relevante quando comparada com uma amostra seca. Whiting *et al.* (2003), a partir de GjØrv *et al.* (1967), concluíram que a diminuição da resistividade eléctrica para uma razão água/cimento de 0.45 até 0.70 é mais pronunciada para um teor de humidade entre 40% e 60%, quando comparada com um grau de saturação de 100%, como se ilustra no diagrama da Figura 2.7.

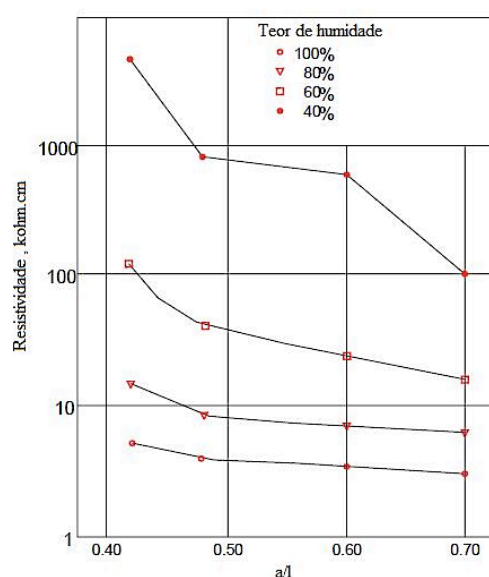


Figura 2.7 – Influência da razão água/ligante e do grau de saturação na medição da resistividade eléctrica (Whiting *et al.*, 2003).

2.1.2.4 Influência do tipo de ligante

A resistividade eléctrica do betão está relacionada com a microestrutura da matriz de cimento, a sua estrutura dos poros, porosidade e distribuição do tamanho dos poros. Também é uma função da concentração de iões e sua mobilidade na solução dos poros (Silva, 2005). A composição química do cimento, o teor de cimento, a relação água ligante, e a utilização de misturas de cimento e materiais complementares são factores que influenciam a microestrutura da matriz de cimento do betão, bem como a composição química da solução dos poros, e, portanto, a resistividade eléctrica. O tipo, teor em alcalis e C_3A (aluminato tricálcico) do cimento são os factores químicos que mais influenciam a resistividade do betão (Silva, 2005).

No trabalho desenvolvido por Whiting *et al.* (2003), foi estudado o efeito de três tipos diferentes de cimento na resistividade eléctrica do betão. Foi utilizado cimento Portland Normal, cimento Portland de endurecimento rápido e cimento aluminoso. A razão água/cimento foi de 0.49. A resistividade eléctrica dos dois cimentos Portland foi muito semelhante. O valor médio às 24 horas para o betão com cimento Portland normal foi de 2350 $\Omega \cdot \text{cm}$ comparado com 2300 $\Omega \cdot \text{cm}$ para o betão utilizando cimento Portland de Endurecimento rápido. A resistividade dos cimentos Portland apresentaram ao final das 24 horas, valores muito próximos, mas o betão fabricado com cimento aluminoso, apresentou, no final do mesmo período, uma resistividade 100 vezes maior comparativamente com o cimento Portland. Ao fim de 150 dias, a relação entre a resistividade eléctrica do betão com cimento aluminoso e os restantes ensaiados passou para perto de 10, como se apresenta na Figura 2.8.

Esta variação da resistividade eléctrica poderá ser explicada pela aceleração do processo de hidratação do cimento aluminoso. À medida que a hidratação se processa, a quantidade de iões presentes na solução porosa vai diminuindo, daí a maior resistividade associado ao cimento aluminoso.

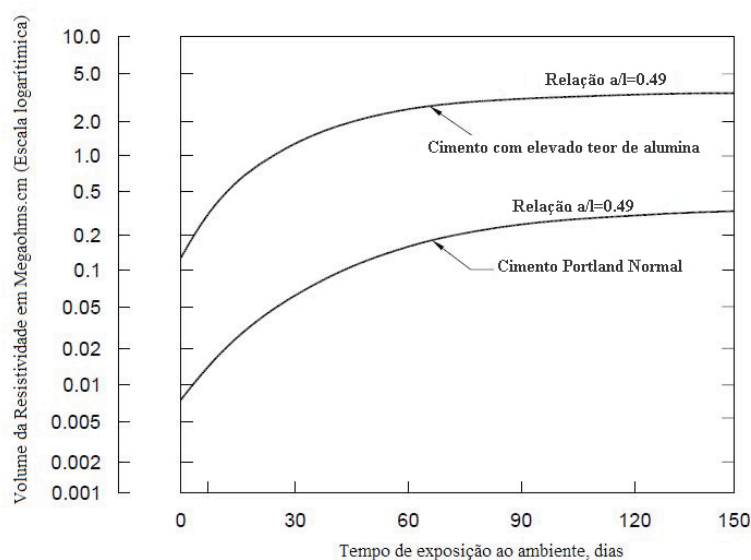


Figura 2.8 – Efeito do tipo de cimento na medição da resistividade eléctrica do betão (Whiting *et al.*, 2003).

Whiting *et al.* (2003) mediram a resistividade de 12 composições diferentes de betão. Foram utilizados provetes cúbicos de 150 mm de aresta, e efectuadas leituras de resistividade às idades de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias de idade. Estas leituras indicaram

uma diminuição da resistividade à medida que a dosagem de cimento aumenta. Para uma dosagem de 0.50 a resistividade diminui quase 20% aumentando a dosagem de cimento de 300 para 400 kg/m³. Para a razão a/c de 0.55, e para o mesmo aumento de dosagem de cimento, a resistividade diminui 25%. O autor conclui que, como a resistividade da pasta de cimento é muito inferior à dos agregados, quanto mais cimento existir num determinado volume de betão, menor será a resistividade, como se ilustra na Figura 2.9.

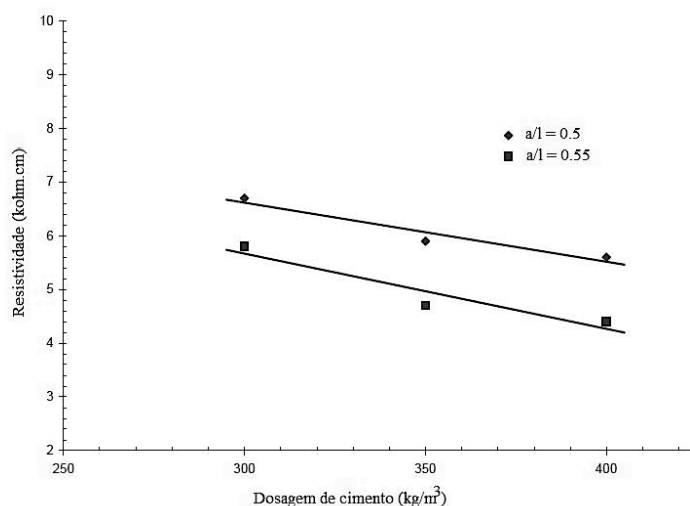


Figura 2.9 – Efeito do teor de cimento na medição da resistividade eléctrica do betão (Whiting *et al.*, 2003).

2.1.2.5 Tipo de agregado

A resistividade eléctrica dos agregados é muito superior ao da pasta de cimento. Em Silva (2005) é apresentado um estudo realizado por Monfore (1968) de valores da resistividade eléctrica de vários tipos de agregados utilizados na composição dos betões. Os resultados obtidos neste estudo são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Absorção de água e resistividade eléctrica de diferentes agregados

Agregado	Absorção de água (%)	ρ (kΩ.cm)
Areia	9.2	18
Xisto	6.0	30
Mármore	0.9	290
Granito	0.34	880

Como se pode observar, para efeitos práticos, a resistividade eléctrica do granito e do mármore pode ser considerada infinita quando comparada com a da pasta do cimento. Embora seja a pasta de cimento que controla a resistividade, qualquer alteração no tipo de agregado utilizado terá influência na resistividade do betão.

2.1.2.6 Dimensões e geometria de provetes

Gowers *et al.* (1999b) realizaram estudos analíticos e experimentais para estabelecer a magnitude de erros entre a resistividade eléctrica aparente e a resistividade real de um elemento de betão com dimensões finitas. Uma variável importante a considerar é o espaçamento mínimo do eléctrodo.

Porque o betão é composto por pasta, agregados, que naturalmente têm diferentes resistividades eléctricas, o espaçamento deve ser suficientemente grande de modo a representar uma média da resistividade eléctrica do betão.

O espaçamento mínimo depende do tamanho máximo do agregado grosso: quanto maior o agregado, maior é o espaçamento mínimo exigido. O espaçamento determina também a profundidade do material que afecta as medições. Quanto maior a distância, maior é a profundidade do betão avaliado.

Segundo as recomendações dos autores Gowers *et al.* (1999b), apresenta-se na Figura 2.10, os parâmetros geométricos e as condições fronteira para medição da resistividade eléctrica no betão. Propõem a utilização de um eléctrodo espaçado de pelo menos 40 mm ($a \geq 40$ mm). A largura e a espessura devem ser pelo menos quatro vezes o espaçamento do eléctrodo. Além disso, a distância ao limite de um dado elemento, não deve ser inferior a duas vezes o espaçamento entre eléctrodos. Quando estas dimensões mínimas não forem observadas, a resistividade eléctrica aparente calculada a partir da Equação [2.2], poderá ser superior à real, do elemento de betão.

A distância ao bordo e o alinhamento dos eléctrodos (paralela à direcção X) deve de ser de pelo menos duas vezes o espaçamento entre os eléctrodos (a), segundo a direcção Y não existem restrições relativamente às condições fronteira. Resumidamente, apresenta-se na Tabela 2.2, as condições fronteira sugerida pelos autores.

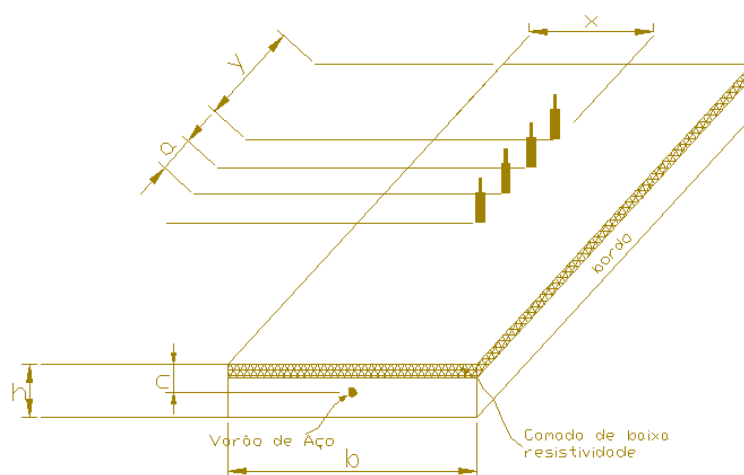


Figura 2.10 – Recomendações geométricas para medição da resistividade eléctrica do betão (traduzido e adaptado de (Gowers *et al.*, 1999b)).

Tabela 2.2 – Condições fronteira optimizadas para avaliação da resistividade eléctrica (Gowers *et al.*, 1999b)

$a > 40 \text{ mm}$	$x \geq 2a$
$a \leq h/4$	$y = \text{sem restrições}$
$a \leq b/4$	
$a \leq (2/3) \cdot c$, caso exista armadura	
$a \geq 8 \cdot t$ (superfície), caso exista camada de baixa resistividade	
$a \geq 1.5 \cdot \text{Max. dimensão do agregado}$	

Morris *et al.* (1996) realizaram estudos experimentais e numéricos (simulação por elementos finitos) de modo a determinar uma constante (k) que relacionasse a resistividade aparente (ρ_a) com a resistividade eléctrica real (ρ_r) ou efectiva de um provete de betão, como se apresenta na equação [2.7], fazendo variar as dimensões das amostras. Para que a resistividade eléctrica, determinada a partir da equação [2.1] seja aproximadamente igual à resistividade real do betão, as dimensões da amostra deverão ser muito maiores do que o espaçamento entre os eléctrodos. Devido ao facto de um provete cilíndrico caracterizar uma peça com dimensões finitas, a resistividade eléctrica medida (ρ_a) poderá não ser exactamente a resistividade real do betão.

As amostras usadas no trabalho desenvolvido por Morris *et al.* (1996) foram provetes cilíndricos de 76.2, 100.2 e 150.2 mm de diâmetro, como se ilustra na Figura 2.11.

$$k = \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad [2.7]$$

O equipamento utilizado para a medição da resistividade eléctrica foi um equipamento da marca CNS RM MKII, que permite o ajuste entre a distância entre eléctrodos. Neste caso, a distância adoptada foi de: $a = 25.4$ mm.

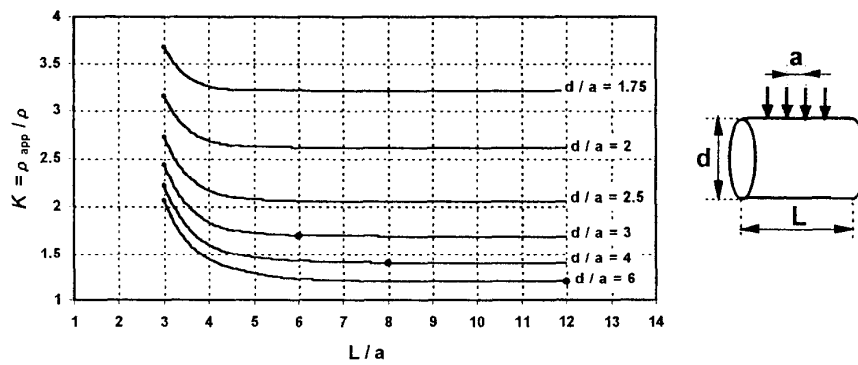


Figura 2.11 – Constante de calibração para diferentes provetes (Morris *et al.*, 1996).

Para os provetes apresentados, a relação (d/a) entre o diâmetro (d) e o espaçamento do eléctrodo (a) foi de 3, 4 e 6 respectivamente, e encontram-se assinalados com um círculo, no diagrama da Figura 2.11.

A constante de calibração obtida em provetes cilíndricos, na direcção longitudinal de acordo com a representação esquemática apresentada na Figura 2.11, para a determinação da constante entre a resistividade aparente (ρ_a) e a resistividade real (ρ_r), foram as seguintes: $K=1.73$ ($d/a=3$), $k=1.41$ ($d/a=4$) e $k=1.20$ ($d/a=6$).

Também os autores Sengul *et. al* (2008), estudaram ao longo do tempo a influência do bordo nas medições da resistividade eléctrica utilizando a técnica dos quatro eléctrodos (Sonda Wenner), de acordo com o set-up de ensaio apresentado na Figura 2.12. Para a moldagem dos provetes com dimensões normalizadas, utilizaram um betão convencional, cimento CEM II/A-V 42.5 R, com uma dosagem de 423 kg/m^3 , razão água ligante de 0.40, e com um abaixamento de 150 mm. Avaliaram a evolução da resistência à compressão e o coeficiente de migração ao longo do tempo (3, 7, 14, 28,

90, 180, 365). No ensaio de compressão e no ensaio de migração obtiveram aos 3 dias de idade 45.3 MPa e $6.2 \text{ m}^2/\text{s} \times 10^{-12}$, respectivamente. Aos 365 dias de idade no ensaio à compressão observaram 97.1 MPa e no ensaio de difusão $1.9 \text{ m}^2/\text{s} \times 10^{-12}$.

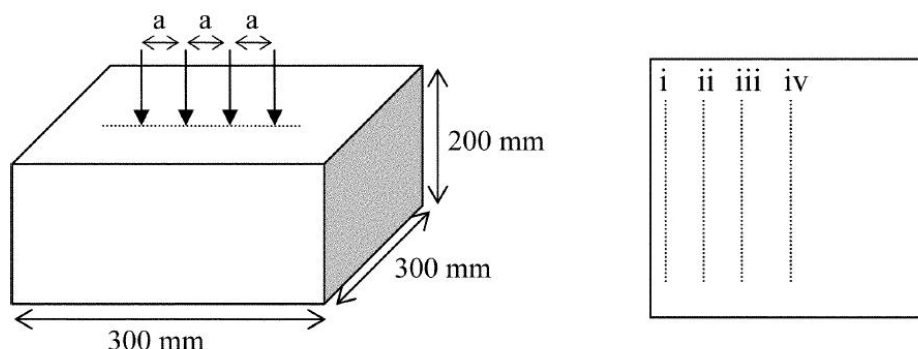


Figura 2.12 – Esquema de ensaio adoptado para medição da resistividade eléctrica (traduzido e adaptado de (Sengul *et al.*, 2008)).

Segundo Polder *et. al.* (2000) o fluxo de corrente dá-se a uma profundidade que é aproximadamente igual ao espaçamento dos eléctrodos (a) da Sonda Wenner.

Para um determinado espaçamento entre os eléctrodos, a resistividade eléctrica aumenta à medida que diminui a distância ao bordo. Porque a corrente eléctrica flui em três dimensões num meio homogéneo, o fluxo de corrente será mais restrito quando as medições de resistividade eléctrica são efectuadas junto do bordo da lajeta, obtendo-se medidas mais elevadas quando nos aproximamos do bordo da laje.

As medições foram realizadas a meio da lajeta, a 10, 35 e 90 mm do bordo, como se apresenta na Figura 2.12 e os resultados apresentam-se na Figura 2.13. Os resultados aumentam quando nos aproximamos do bordo. Estes resultados são independentes da idade do betão.

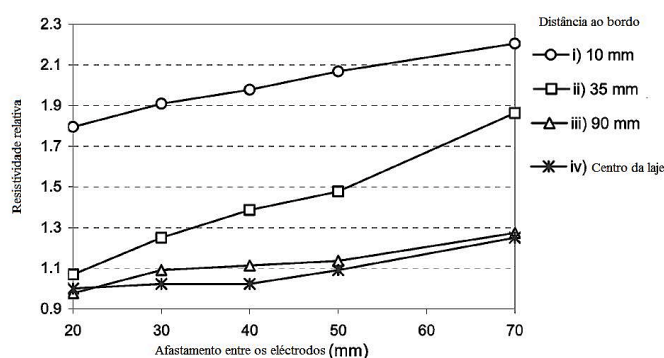


Figura 2.13 – Influência das medições na resistividade eléctrica utilizando a Sonda Wenner (traduzido e adaptado de (Sengul *et al.*, 2008)).

2.1.2.7 Influência das armaduras na medição da resistividade eléctrica

Gowers *et. al.* (1999b) investigaram a presença de armadura num elemento de betão armado e concluíram que, a corrente pode aparecer distorcida, quando a medição da resistividade eléctrica, utilizando a técnica dos quatro eléctrodos (Sonda Wenner), for realizada sobre as armaduras. Estudos numéricos recorrendo a elementos finitos concluíram que os resultados serão afectados caso as medições sejam realizadas directamente sobre a armadura. Os erros de medição podem ser minimizados caso as medições sejam realizados na diagonal ou paralelas às armaduras. Na eventualidade de os ensaios sejam realizados sobre as armaduras, a camada de recobrimento da armadura deve ser de pelo menos uma vez e meia superior ao do espaçamento entre os eléctrodos ($c \geq 1.5 \cdot d$), como se ilustra na Figura 2.14. Uma outra conclusão que se pode tirar da leitura da Figura 2.14 é que a resistividade aparente/resistividade real tende para 1 quando $\phi/d = 0.8$.

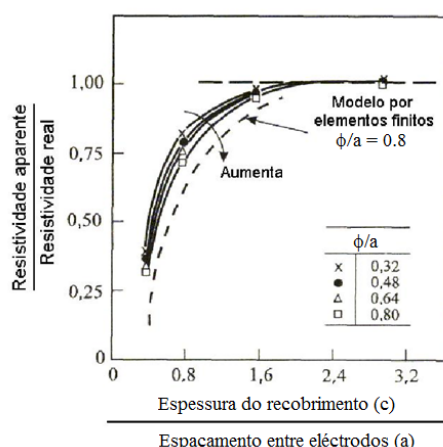


Figura 2.14 – Influência da presença de armadura na medição da resistividade eléctrica (Hoppe, 2005).

Sengul *et al.* (2009), estudaram a influência de um varão embebido numa laje, com as seguintes dimensões: 300 × 300 × 135 mm, com diferentes espessuras de recobrimento, 50 e 75 mm, como se apresenta na Figura 2.15. Efectuaram medições na direcção paralela e perpendicular ao varão embebido. Os provetes foram moldados com um betão convencional, com um abaixamento de 150 mm.

A quantidade de cimento Portland utilizada na mistura foi de 423 kg/m³, com uma razão água/ligante de 0.40. Os modelos foram colocados em ambiente saturado a 20 °C, 7 dias após a moldagem, foram colocadas em ambiente laboratorial a 20 °C e ambiente

saturado. Avaliaram a evolução da resistência mecânica e o coeficiente de difusão aos 3, 7, 14 e 28 dias de idade. Aos 3 dias de idade obtiveram uma resistência à compressão e um coeficiente de difusão de 45.3 MPa e $19.5 \text{ m}^2/\text{s} \times 10^{-12}$, respectivamente. Aos 28 dias de idade observaram no ensaio de compressão e no ensaio de coeficiente de difusão, 68.6 MPa e $6.2 \text{ m}^2/\text{s} \times 10^{-12}$, respectivamente.

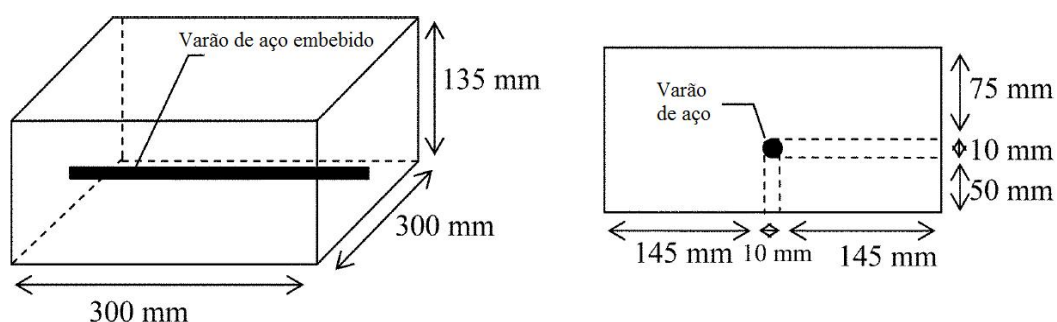


Figura 2.15 – Dimensões das lajes com varão de aço embebido (traduzido e adaptado de (Sengul *et al.*, 2009)).

Foram realizadas medições na direcção perpendicular e na direcção paralela ao varão embebido, como se ilustra na Figura 2.16. Os autores concluíram que a medição em diferentes direcções apresenta resultados distintos.

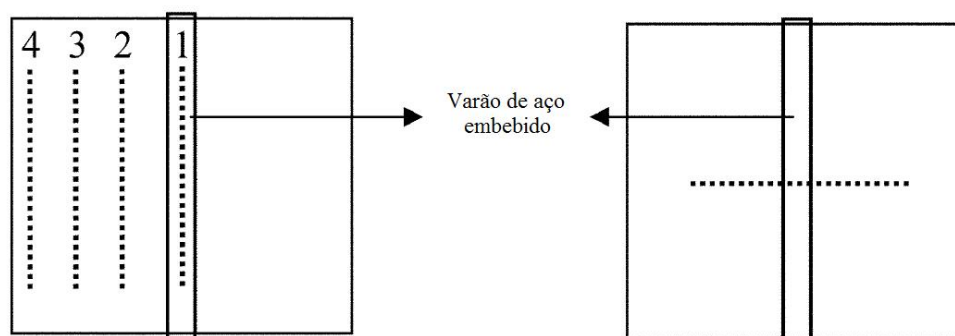


Figura 2.16 – Configuração do esquema de medição (traduzido e adaptado de (Sengul *et al.*, 2009)).

Comparando os resultados obtidos num modelo de laje sem armadura, modelo apresentado na Figura 2.12, e para um determinado espaçamento entre eléctrodos, concluíram que, a presença de um varão de aço pode aumentar aproximadamente em 10% o valor da resistividade eléctrica efectuando as medições perpendicularmente ao varão, como se ilustra na Figura 2.16.

Os autores investigaram, também, a influência do espaçamento entre os eléctrodos e concluíram que, se o espaçamento for superior a 30 mm, a resistividade eléctrica aumenta, e quanto maior for o espaçamento entre os eléctrodos maior será o valor da resistividade eléctrica. Para um espaçamento entre os eléctrodos de 70 mm, o aumento da resistividade eléctrica observada foi de 26%. Uma justificação possível para o efeito será a profundidade do fluxo de corrente percorrido no betão e com menor teor de humidade.

Para os eléctrodos espaçados de pelo menos 30 mm, e para uma espessura de recobrimento de 50 mm, a resistividade eléctrica parece não ser afectada significativamente pela presença de um elemento de aço no betão, como se apresenta na Figura 2.17 (Sengul *et al.*, 2009).

Relativamente às medições na direcção paralela e perpendicular é possível observar na Figura 2.17 que, segundo a direcção perpendicular à armadura, os resultados da resistividade eléctrica são mais elevados comparativamente com a medição efectuada na direcção paralela, para uma espessura de recobrimento de 50 mm. Sengul *et. al.* (2009), concluíram que o fluxo de corrente deveria agir como meio de transporte da corrente, mas ao que parece o elemento de aço embebido no betão, e perpendicular ao fluxo de corrente, parece agir como um obstáculo.

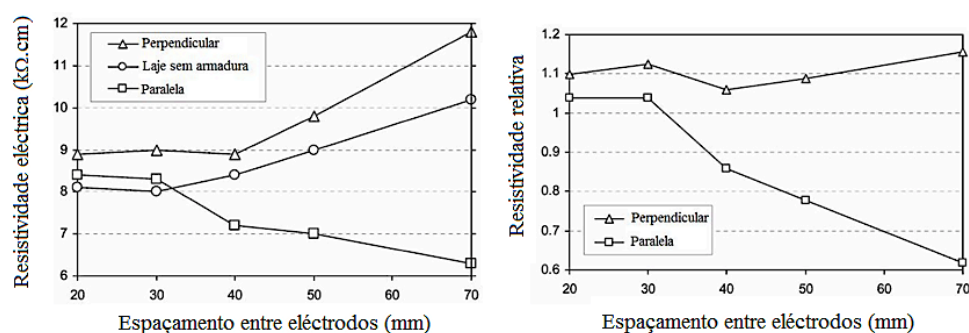


Figura 2.17 – Influência do afastamento entre os eléctrodos e da direcção na medição da RE (recobrimento: 50 mm), (traduzido e adaptado de (Sengul *et al.*, 2009).

Como a corrente flui mais profundamente devido ao espaçamento dos eléctrodos, o efeito do contorno da base da laje também pode afectar a resistividade. O fluxo de corrente está confinado a uma profundidade limitada, o que aumenta a resistividade observada.

À medida que se aumenta o espaçamento entre os eléctrodos, e para o afastamento máximo ($a = 70$ mm), é possível observar na Figura 2.18, que a resistividade decresce significativamente, 38 % para uma espessura de recobrimento de 50 mm, e de 22 % para uma espessura de recobrimento de 75 mm.

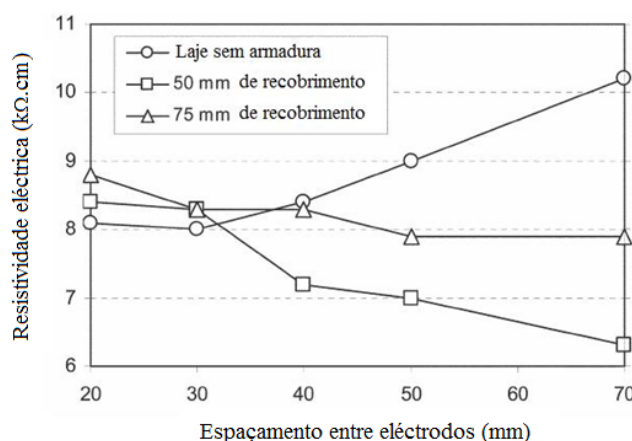


Figura 2.18 – Efeito do recobrimento na medição da resistividade eléctrica utilizando a sonda Wenner (traduzido e adaptado de (Sengul *et al.*, 2008; Sengul *et al.*, 2009)).

Em estruturas de betão armado, é imprescindível o levantamento das armaduras existentes, com recurso a um detector de armaduras e realizar, sempre que possível, as medições de resistividade eléctrica o mais afastado possível de elementos de aço.

2.1.2.8 Relação com parâmetros de durabilidade

Actualmente existe uma grande variedade de métodos para avaliar o desempenho e a durabilidade do betão. A resistividade eléctrica (ρ) de um betão saturado, depende essencialmente, do volume ocupado pelos poros (tamanho dos poros, conectividade, etc), tipo de cimento (resistividade intrínseca do gel C-S-H), grau de saturação e temperatura (Andréa, 2010). Uma grande variedade de mecanismos, físicos ou químicos, podem actuar no transporte de agentes agressivos para o interior do betão, dependendo do escoamento sub-superfície e da sua concentração local, das condições do meio ambiente, da estrutura porosa do betão, dos raios dos poros ou as espessuras das micro-fendas (Ferreira, 2000). A penetração dos fluidos no betão pode dar-se por diversos mecanismos, e podem não ocorrer isoladamente, podendo haver um conjunto combinado de acções entre eles. Os mais relevantes são a difusão, a absorção por capilaridade e a permeabilidade. A difusão é um processo pelo qual um fluido pode passar através do betão devido a um gradiente de concentração.

O transporte de água por capilaridade no betão é função da relação/cimento, da granulometria dos agregados, do teor de humidade da amostra e do processo de cura. No caso de betões com a superfície não saturada, este mecanismo de transporte evidencia-se na penetração do ião cloro (Andréa, 2010).

A entrada de água na rede porosa de betão é devida a forças capilares que resultam da diferença de pressão entre a superfície livre da água exterior ao betão e a sua superfície nos poros capilares. Este processo ocorre na presença de ciclos de molhagem e secagem e é proporcional à raiz quadrada do tempo e do raio capilar (Figueiras, 2006). A absorção de água por capilaridade pode ser medida pela altura que o líquido atinge no betão ou pela variação de massa da amostra colocada numa superfície em contacto com o fluido, que é absorvido rapidamente, o que significa que existe um caminho privilegiado. Caso a absorção seja lenta, os raios capilares serão mais estreitos (Ferreira, 2000).

Finalmente, a permeabilidade de um betão representa uma das propriedades mais importantes e tem um papel fundamental na previsão e evolução do betão, no avanço de agentes agressivos para o interior do betão. A permeabilidade está associada às propriedades fundamentais do material e do seu sistema de poros (volume de vazios, distribuição, conectividade, etc).

2.2 Ensaios para medição da resistividade eléctrica

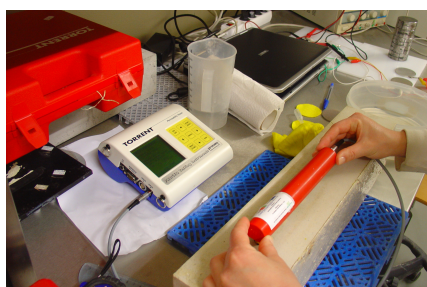
A medição da resistividade eléctrica em laboratório e em obra, pode ser realizada de acordo com as recomendações descritas por Polder *et al.* (2000), (2001) e Gowers *et al.* (1999b). Polder (2000), (2001), descreve os procedimentos a adoptar para as diferentes técnicas de ensaio, a técnica dos 2-eléctrodos e dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner) e também a metodologia a seguir caso as medições sejam realizadas em estruturas de betão armado, de forma a poder minimizar o efeito da armadura nas medições da resistividade eléctrica.

(Gowers *et al.*, 1999a) descrevem fundamentalmente, os diversos factores que podem influenciar as medições da resistividade eléctrica usando a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner), nomeadamente a influência da geometria das amostras, o efeito das condições fronteira e a influência da presença da armadura. São propostas uma série de procedimentos e boas práticas, de modo a que todos estes factores possam ser minimizados, de forma a poder obter medições da resistividade eléctrica com a máxima fiabilidade e reprodutibilidade.

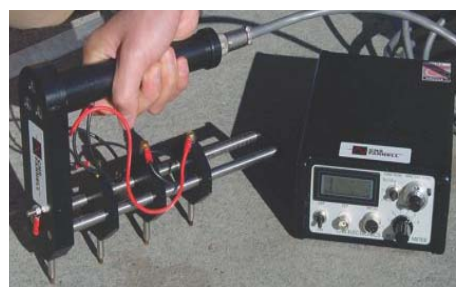
2.2.1 Equipamentos para medição da resistividade eléctrica

No mercado existem basicamente três tipos de equipamento, dois que medem a resistividade eléctrica e um outro que avalia a condutividade eléctrica do betão. Relativamente aos equipamentos para medição de resistividade eléctrica, existe um equipamento disponível no mercado, em que a distância entre os eléctrodos (a) é constante entre si, e de 50 mm – Sonda Wenner (Figura 2.19 a)), modelo TORRENT da marca Proceq, e um equipamento da marca CNS FARNELL – RM MK II (Concrete resistivity meter model U95) (ver Figura 2.19 b)) e que actualmente é comercializado pela Proceq. Este equipamento (CNS FARNELL) tem a grande vantagem de poder ajustar os eléctrodos entre si. Recomenda-se que a distância entre os eléctrodos seja equidistante, e não inferior a 30 mm. Salvo raras excepções, possa ser utilizada com 20 mm de afastamento. O equipamento também permite medir a intensidade de corrente e a resistência eléctrica. A grande vantagem da utilização deste equipamento é a aplicação in-situ, em estruturas de betão armado, devido à possibilidade de permitir ajustar a distância entre os eléctrodos, depois de conhecer a espessura de recobrimento das armaduras, definir a distância entre os eléctrodos, minimizando a influência das armaduras na medição da resistividade eléctrica.

O modelo MERLIN BULK conductivity tester comercializado pela GERMANN INSTRUMENTS A/S (ver Figura 2.20) permite avaliar a condutividade eléctrica do betão (a condutividade eléctrica do betão é o inverso da resistividade eléctrica). Este ensaio tem de ser conduzido em provetes cilíndricos saturados, com diâmetro compreendido entre 90 a 110 mm e com mais de 200 mm de comprimento. As características de maior importância encontram-se apresentadas na Tabela 2.3.



a)



b)

Figura 2.19 – Equipamentos para medição da resistividade e condutividade eléctrica do betão: a) TORRENT – Proceq; b) RM MK II (Proceq) (Minho, 2005).



a)



b)

Figura 2.20 – Equipamentos para medição da condutividade eléctrica do betão: a) ; b) barra de referência (INSTRUMENTS, 2009) .

Tabela 2.3 – Características dos equipamentos

Características	Torrent - Proceq	RM MK II	MERLIN Bulk
Frequência (Hz) - CA	72	60	325
Impedância	10 MΩ	-	-
Frequência de aquisição	180 μA	-	5 Hz

Capítulo III – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS, PROCEDIMENTOS E CONDUÇÃO DOS ENSAIOS

3.1 Descrição do plano de ensaios

O objectivo do presente programa experimental é avaliar a influência de diferentes técnicas de ensaio na medição da resistividade eléctrica, técnica dos 2-eléctrodos e a técnica dos 4-eléctrodos em provetes de dimensões padrão (cúbicos e cilíndricos). Aplicar a medição da resistividade eléctrica em lajetas de betão usando a técnica dos 4-eléctrodos, estimando a influência do rebordo e de elementos de aço na medição da resistividade eléctrica ao longo do tempo. Avaliar a medição da resistividade eléctrica no controlo de qualidade do betão com base num ensaio não destrutivo, a resistividade eléctrica, sob diferentes condições de cura, com temperatura e humidade relativa controlada. De modo a atingir este objectivo, serão definidas relações entre as características de desempenho mecânicas e de durabilidade, sob a influência de diferentes condições de cura. Com os resultados obtidos experimentalmente pretende-se avaliar a qualidade do betão, e estimar a resistência mecânica do betão aos 28 e 90 dias de idade, com base no ensaio de resistividade eléctrica.

No programa experimental realizado fabricaram-se aproximadamente 500 L de betão fresco, 400 L destinadas à moldagem de provetes com dimensões normalizadas,

(provetes cúbicos de 150 mm de aresta, e provetes cilíndricos de 150 mm e 300 mm de altura, 150 mm de diâmetro e 50 mm de altura, 100 mm diâmetro e 100 mm de altura), para avaliar a influência de diferentes condições de cura, humidade e temperatura controladas, na avaliação de parâmetros mecânicos e de durabilidade.

Os restantes 100 L foram destinados aos provetes em forma de lajetas, com e sem armadura, acompanhados, também, de alguns provetes cúbicos e cilíndricos para validação de resultados. O objectivo de moldar lajetas, com e sem armadura foi avaliar a influência das condições fronteira e da presença de armadura nas medições da resistividade eléctrica. Após a desmoldagem, os provetes foram colocados em diferentes condições de cura: em ambiente saturado a 30 °C, 20 °C e 5 °C, e no interior de uma câmara climática a 20 °C e 50 % de humidade relativa. O procedimento experimental adoptado em cada uma das cinco amassaduras realizadas no Laboratório do Betão Estrutural da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), serão descritos cronologicamente.

Dia 0

- Betonagem dos seguintes provetes de betão (Amassadura A, B, C e D):
 - 18 provetes cúbicos de 150 mm de aresta para avaliação da resistividade eléctrica e resistência mecânica aos 1, 3, 8, 29 e 91 dias de idade;
 - 3 provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura para avaliação da resistividade eléctrica, usando a técnica dos 2-eléctrodos e dos 4-electrodos (sonda Wenner) ao longo do tempo, 1, 3, 8, 15, 22, 29e 91 dias de idade;
 - 12 provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 100 mm de altura para realização do ensaio de migração em regime não estacionário;
 - 6 provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 50 mm de altura, para realização do ensaio de absorção de água por capilaridade, a realizar aos 91 dias de idade;
 - Revestimento da superfície dos provetes com uma película de acetato e de um azulejo, durante o processo de cura.

Dia 1

- Remoção do revestimento aplicado na superfície;
- Desmoldagem de todos os provetes e colocação nas respectivas condições de cura;

- Avaliação da resistividade eléctrica (2-eléctrodos e 4-eléctrodos) em provetes cúbicos (150 mm de aresta), seguido do ensaio de resistência mecânica à compressão;
- Avaliação da resistividade eléctrica em provetes cilíndricos (150 × 300 mm) usando a técnica dos 4-eléctrodos (sonda Wenner);

Dia 3

- Avaliação da resistividade eléctrica (2-eléctrodos e 4-eléctrodos) em provetes cúbicos (150 mm de aresta), seguido do ensaio de resistência mecânica à compressão;
- Avaliação da resistividade eléctrica em provetes cilíndricos (150 × 300 mm) usando a técnica dos 2-eléctrodos e 4-eléctrodos (sonda Wenner);

Dia 7

- Preparação do ensaio de migração: colocação das amostras em sistema de vácuo e, posteriormente, na solução de hidróxido de cálcio hidratado;

Dia 8

- Avaliação da resistividade eléctrica (2-eléctrodos e 4-eléctrodos) em provetes cúbicos (150 mm de aresta), seguido do ensaio de resistência mecânica à compressão;
- Avaliação da resistividade eléctrica em provetes cilíndricos (150 × 300 mm) usando a técnica dos 2-eléctrodos e 4-eléctrodos (sonda Wenner);
- Montagem do esquema de ensaio e condução do ensaio de migração em regime não estacionário;

Dia 15 e Dia 22

- Avaliação da resistividade eléctrica em provetes cilíndricos (150 × 300 mm) usando a técnica dos 2-eléctrodos e 4-eléctrodos (sonda Wenner);

Dia 28

- Preparação do ensaio de migração: colocação das amostras em sistema de vácuo, e posteriormente na solução de hidróxido de cálcio hidratado;

Dia 29

- Avaliação da resistividade eléctrica (2-eléctrodos e 4-eléctrodos) em provetes cúbicos (150 mm de aresta), seguido do ensaio de resistência mecânica à compressão;
- Avaliação da resistividade eléctrica em provetes cilíndricos (150 × 300 mm) usando a técnica dos 2-eléctrodos e 4-eléctrodos (sonda Wenner);
- Montagem do esquema de ensaio e condução do ensaio de migração em regime não estacionário;

Dia 90

- Preparação do ensaio de migração: colocação das amostras em sistema de vácuo e posteriormente, na solução de hidróxido de cálcio hidratado;

Dia 91

- Avaliação da resistividade eléctrica (2-eléctrodos e 4-eléctrodos) em provetes cúbicos (150 mm de aresta), seguido do ensaio de resistência mecânica à compressão;
- Avaliação da resistividade eléctrica em provetes cilíndricos (150 × 300 mm) usando a técnica dos 2-eléctrodos e 4-eléctrodos (sonda Wenner);
- Montagem do esquema de ensaio e condução do ensaio de migração em regime não estacionário;
- Preparação do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Relativamente à amassadura E, a cronologia dos ensaios foi a seguinte:

Dia 0

- Betonagem dos seguintes provetes de betão:
 - 3 provetes cúbicos de 150 mm de aresta para avaliação da resistência mecânica às 24 horas para validação de resultados;
 - 3 provetes cúbicos para avaliação da resistividade eléctrica, usando a técnica dos 2-eléctrodos e dos 4-electrodos (sonda Wenner) ao longo do tempo
 - 2 provetes cilíndricos para avaliação da resistividade eléctrica, usando a técnica dos 2 e dos 4-electrodos (sonda Wenner) ao longo do tempo;

- moldagem de duas lajetas com as seguintes dimensões: $400 \times 360 \times 200$ mm (base \times altura \times espessura) para avaliação da resistividade eléctrica ao longo do tempo;

Dia 1

- Avaliação da resistividade eléctrica (Sonda Wenner) em provetes cúbicos (150 mm de aresta), seguido do ensaio de resistência mecânica à compressão;
- Avaliação da resistividade eléctrica (Sonda Wenner) em provetes cilíndricos;
- Desmoldagem das lajetas e colocação numa câmara climática, 20 °C e humidade relativa ≥ 95 %;

Dia 2

- Avaliação da resistividade eléctrica (Sonda Wenner) em provetes cúbicos (150 mm de aresta) e provetes cilíndricos (150 \times 300 mm);
- Ensaio de resistividade eléctrica nos modelos de lajes com e sem armadura, no interior da câmara climática;

Dia 3, 7, 21

- Avaliação da resistividade eléctrica (Sonda Wenner, técnica dos 2-eléctrodos) e em provetes cúbicos (150 mm de aresta) e provetes cilíndricos (150 \times 300 mm);
- Ensaio de resistividade eléctrica nos modelos de lajes com e sem armadura, no interior da câmara climática;

Dia 24

- Ensaio de resistividade eléctrica nas lajetas sem armadura, no interior da câmara climática, para validação de resultados;

Dia 38, 151

- Avaliação da resistividade eléctrica (Sonda Wenner, técnica dos 2-eléctrodos) em provetes cúbicos (150 mm de aresta) e provetes cilíndricos (150 × 300 mm);
- Ensaio de resistividade eléctrica nas lajetas com e sem armadura, no interior da câmara climática;

3.2 Caracterização dos materiais

3.2.1 Cimento portland

No decurso da presente programa experimental, o cimento utilizado foi do Tipo I classe 42.5 R da fábrica SECIL do Outão. Na Tabela 3.1, apresenta-se a caracterização química, física e mecânica do cimento fornecida pela SECIL e na Figura 3.1 a respectiva curva granulométrica.

Tabela 3.1 – Caracterização química, física e mecânica do cimento CEM I 42.5 R

Caracterização Química	SiO ₂	19.82 (%)	
	Al ₂ O ₃	4.22 (%)	
	Fe ₂ O ₃	3.40 (%)	
	CaO	62.66 (%)	
	MgO	2.21 (%)	
	Perda ao Fogo	3.0 (%)	
	SO ₃	3.47 (%)	
	CL-	0.03 (%)	
	Resíduo insolúvel	1.1 (%)	
Caracterização Física	Massa Volúmica	3110 kg/m ³	
	Superfície específica	4112 cm ² /g	
	Resíduo 45 µm	2.0 (%)	
	Tempo de início de presa	127 minutos	
	Tempo de fim de presa	162 minutos	
	Expansibilidade	0.7 (mm)	
Caracterização Mecânica	Idade (dias)	Resist. Flexão / Compressão (MPa)	
	2	6.1	33.4
	7	7.5	46.6
	28	8.1	58.1

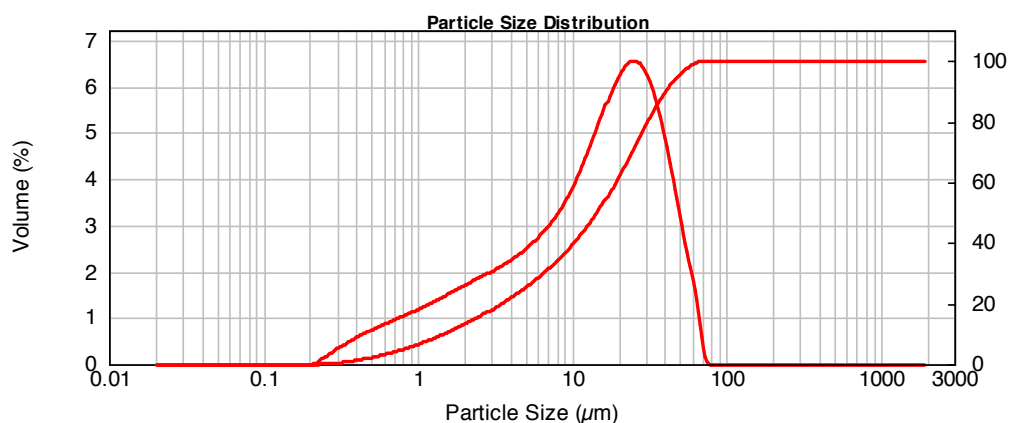


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica, em volume, do cimento CEM I 42.5 R.

3.2.2 Adições

De modo a poder fabricar uma composição de betão auto-compactável – BAC é necessário o recurso a uma maior quantidade de finos, nomeadamente o cimento e o fíler calcário. Na composição de BAC produzida, foi utilizado o fíler calcário (Micro 100) fornecido pela Comital (Companhia Mineral de Talcos, Lda). Na Tabela 3.2 apresentam-se as respectivas características físicas e químicas, e na Figura 3.2 ilustra-se a respectiva curva granulométrica do fíler calcário.

Tabela 3.2 - Caracterização química, física do fíler calcário da Comital

Caracterização Química	CaCO ₃	99 (%)
	MgCO ₃	0.3 (%)
	Fe ₂ O ₃	0.02 (%)
	Cloretos	< 0.001 (%)
	Enxofre total	< 0.04 (%)
	Insolúveis em HCl	0.2 (%)
Caracterização Física	Massa Volúmica	2680 Kg/m ³
	Densidade aparente	900 Kg/m ³
	Partículas inferiores a 2 mm	100 (%)
	Partículas inferiores a 125 μm	99 (%)
	Partículas inferiores a 63 μm	85 (%)
	Diâmetro médio	6.53 μm

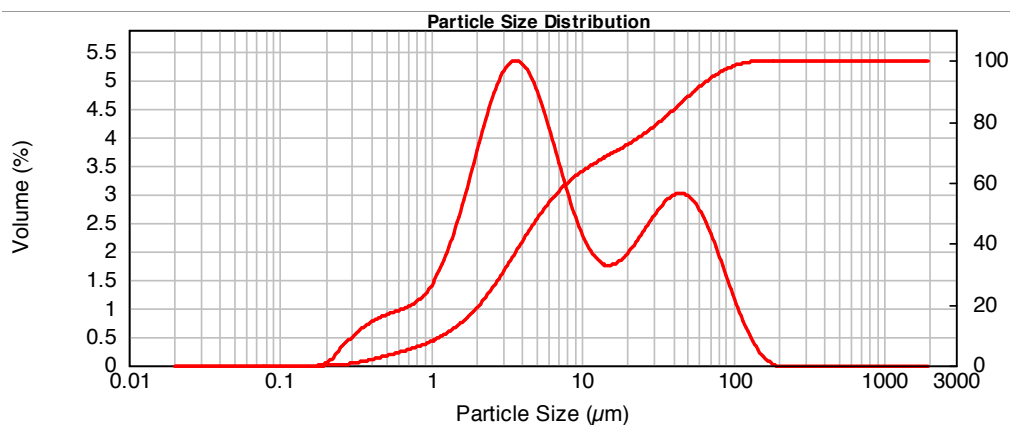


Figura 3.2 – Distribuição granulométrica, em volume, do filler calcário (Micro 100).

3.2.3 Agregados

Na composição de BAC produzida, utilizou-se um conjunto de agregados constituído por duas areias naturais, e por uma brita granítica. A areia fina natural (areia 1), originária de Ovar (areia de dunas), e uma areia média (areia 2) extraída do rio Tejo, e uma brita granítica (brita 1) com máxima dimensão de 19.0 mm. A areia média e a brita granítica foram fornecidas pela empresa Qualibetão do grupo MotaEngil. Na Figura 3.3, ilustra-se a aspecto geral dos agregados utilizados, na Tabela 3.3 a distribuição granulométrica (valor em percentagem dos passados) e as principais características, e na Figura 3.4 o respectivo fuso granulométrico.

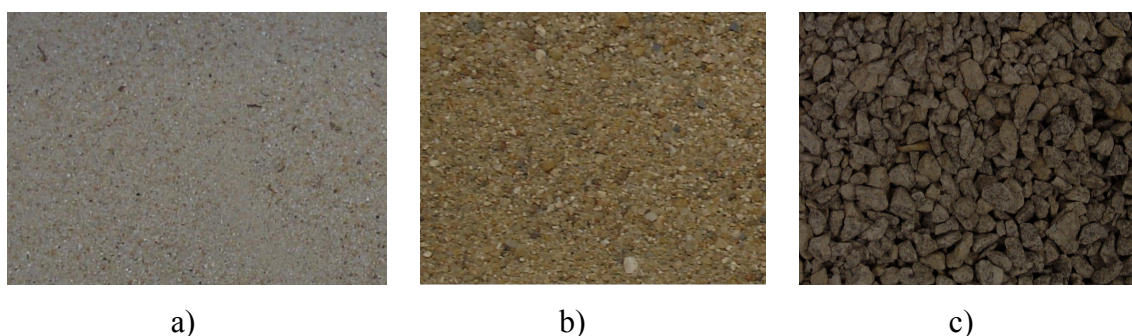


Figura 3.3 – Aspecto geral dos agregados utilizados no fabrico do betão – BAC:

a) areia fina (areia 1); b) areia média (areia 2); c) brita granítica.

Tabela 3.3 – Distribuição granulométrica dos agregados

Peneiro (mm)	Agregado Finos (1)		Agregado grosso (1)
	Areia 1	Areia 2	Brita 1
25	100	100	100
19	100	100	100
12.5	100	100	75.3
9.5	100	100	37.3
4.75	100	99.9	1.0
2.36	100	89.2	0.5
1.18	100	56.4	0.5
0.60	84	13.9	0.5
0.30	17	1.5	0.5
0.150	0	0.4	0.5
0.0750	0	0.1	0.5
Dimensão máxima (mm)	1.18	4.75	19.0
Módulo de Finura	1.98	3.39	6.59
Massa Volúmica (kg/m ³)	2630	2620	2632
Absorção de água (%)	0.2	0.4	0.94

(1) Valores em percentagem de passados

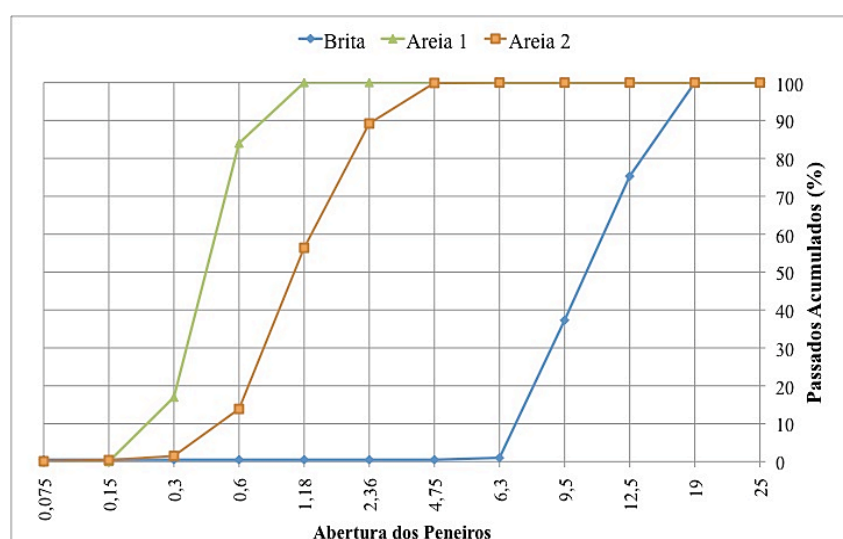


Figura 3.4 – Distribuição granulométrica dos agregados utilizados no BAC.

3.2.4 Superplastificante

Para a composição de BAC realizada, foi utilizado o Superplastificante ViscoCrete 3006, fornecido pela empresa SIKA. As propriedades mais importantes encontram-se apresentadas na Tabela 3.4. O Superplastificante é recomendado pelo fornecedor para as seguintes aplicações, betão auto-compactável (BAC), betão com manutenção de consistência favorável, betão com capacidade para redução de água das amassaduras elevadas e para caldas de injeção. A capacidade para redução de água de amassadura e manutenção da consistência permite o fabrico de betões de elevado desempenho. Este produto é indicado para a produção de betão pronto industrial ou betão fabricado em estaleiro, com capacidade para tempo de betonagens demorados e de transporte.

Tabela 3.4 – Propriedades do Superplastificante ViscoCrete 3006 – SIKA

Informação Técnica	ViscoCrete 3006
Base	Policarboxilatos modificados em base aquosa
Aspecto	líquido castanho claro
Peso Específico	$1.050 \pm 0.02 \text{ kg/dm}^3$
Teor de Sólidos	18.0 ± 1.8
pH	4.5 ± 1.0
Dosagem	1.0 - 2.0% (*)
(*) dosagem relativa à massa de cimento	

3.3 Caracterização de BAC

3.3.1 Introdução

As três propriedades essenciais de um betão auto-compactável são a capacidade de preenchimento, a resistência à ocorrência de segregação e a capacidade de passagem, e devem em geral, ser sempre avaliadas. No entanto, elas são dependentes entre si, apresentando um maior ou menor grau de relacionamento (Camões, 2008).

Existe actualmente pré-normas e normas que estabelecem os procedimentos de ensaio para avaliação do betão auto compactável no estado fresco, de modo a generalizar o uso do BAC na construção em geral.

O programa experimental foi desenvolvido no LABEST, assim decidiu-se usar betão auto-compactável, uma tecnologia que tem sido desenvolvida e otimizada por investigadores do LABEST ((Nunes, 2001), (Figueiras, 2006)).(Gowers *et al.*, 1999a) Assim, a investigação desenvolvida neste trabalho, pode ser facilmente implementada na prática corrente dos trabalhos laboratoriais do LABEST, em trabalhos de investigação e desenvolvimento e também no apoio à indústria.

3.3.2 Amassadura e procedimentos de BAC

No presente estudo foi utilizado uma composição de betão auto-compactável – BAC, incorporando cimento Portland (CEM I 42.5 R) e fíler calcário, uma brita granítica, e duas areias naturais, designadas como areia 1 e areia 2. A composição adoptada em todas as amassaduras realizadas encontra-se apresentada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Composição de Betão auto-compactável

Materiais	Kg / m ³
Cimento (CEM I 42,5R)	407
Fíler Calcário	186
Areia 1	422
Areia 2	327
Brita granítica	823
Água	159
Superplastificante (líquido)	7.7
água / cimento	0.41
água / finos	0.28

As amassaduras de betão auto compactável (BAC), foram fabricados numa betoneira de eixo vertical, com capacidade para misturar até 100 L de betão fresco. O procedimento de amassadura seguido, em cada uma das amassaduras, foi o seguinte:

a) colocam-se os agregados finos, de seguida o agregado grosso (brita 1), e $\frac{1}{4}$ de água total, a água necessária correspondente à absorção dos agregados, durante 2.5

minutos;

b) parou-se o movimento da misturadora durante 2.5 minutos, de modo a dar-se a absorção dos agregados;

c) adicionaram-se os finos (cimento + filler), e aos 6 minutos os restantes $\frac{3}{4}$ da água total. A adição da água deve demorar aproximadamente 1 minuto ;

d) adicionou-se o superplastificante aos 8 minutos, e esta tarefa deve demorar aproximadamente 1 minuto;

e) Parou-se a mistura aos 12 minutos, e descolaram-se das pás e das paredes da misturadora os materiais aderentes;

f) Recomeçou-se a mistura aos 13 minutos, e aos 14 minutos deu-se por terminada a mistura e iniciou-se a caracterização do BAC no estado fresco.



Figura 3.5 – Fase de adição de $\frac{1}{4}$ da água



Figura 3.6 – Fase final de amassadura

3.3.2.1 Ensaios do BAC no estado fresco

No presente programa experimental o volume total foi conseguido (A, B, C, D, E) juntando duas amassaduras de 50 L, realizadas segundo o mesmo procedimento descrito em 3.3.2.

Após a mistura foram realizados os ensaios do BAC no estado fresco, através dos seguintes ensaios: ensaio de espalhamento (Slump-flow test) de acordo com a pr EN 12350-8, o ensaio do funil (pr EN 12350-9), o ensaio da caixa em L (pr EN 12350-10), e o ensaio de segregação (pr EN 12350-11). Os resultados médios obtidos em cada um dos ensaios encontram-se apresentados nas Tabelas 3.6 a 3.9.

3.3.2.2 Ensaio de espalhamento

O ensaio de abaixamento pretende avaliar o espalhamento e o tempo que demora a atingir o diâmetro de 500 mm. O ensaio foi realizado de acordo com a NP EN 12350-8/2010 (IPQ, 2010b). Na Figura 3.7, apresenta-se, esquematicamente, as dimensões do cone de Abrams utilizado nas medições. Para a realização deste ensaio, para além do cone de Abrams, é necessário uma chapa de aço inox de 800 mm de aresta, com uma espessura mínima de 2mm, e que a base seja constituída por uma marcação suave de uma circunferência de 500 mm. O procedimento adoptado para a realização do ensaio Slump-Flow Test foi o seguinte:

- Humedeceu-se o cone de Abrams e a chapa de aço inox, passando com um pano húmido; ter o cuidado de avaliar se a superfície está perfeitamente nivelada;
- Encheu-se o cone de Abrams de uma só vez, sem qualquer tipo de vibração para todo o sistema de ensaio; o tempo que o betão demora a atingir o diâmetro de 500 mm (T_{50} , segundos) é medido por um cronómetro desde o início do levantamento do cone até o diâmetro máximo da área a atingir a circunferência de 500 mm (Nunes, 2001);
- Após a conclusão do movimento do betão, mediu-se o diâmetro aparentemente máximo (Figura 3.8) na área de espalhamento do betão e o diâmetro perpendicular a este. Para o valor do diâmetro do espalhamento da amostra do betão testada tomou-se a média de dois diâmetros registados (Nunes, 2001).

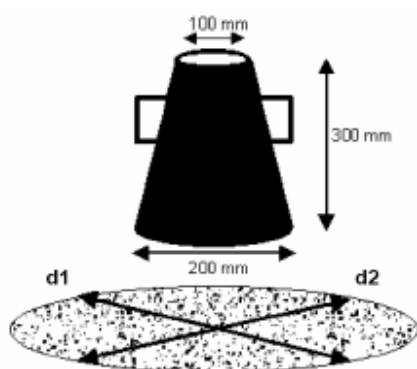


Figura 3.7 – Geometria do funil

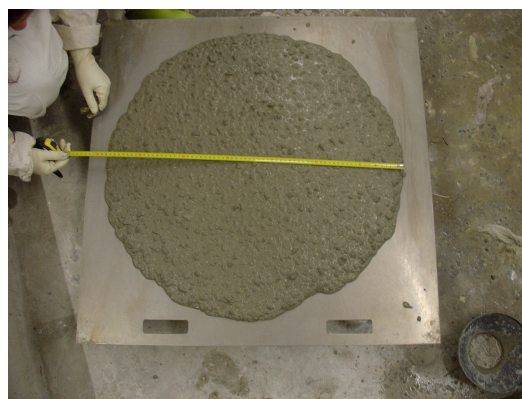


Figura 3.8– Slump - Flow

Na Tabela 3.6, apresenta-se a referência da amassadura, o diâmetro médio (d_{mi}) e o tempo observado (T_{500}) obtido a partir da média de duas amassaduras, o diâmetro e o

tempo médio obtido da média de todas as amassaduras realizadas para as diferentes condições de cura (A, B, C, D, E).

Tabela 3.6 – Resultados médios obtidos no ensaio de espalhamento (Slump Test)

Ref. ^a da amassadura	d _{mi} (mm)	T ₅₀₀ (s)	d, T (médio)		δ (%)	
			(mm)	(s)		
A. 30 °C, Sat.	747.3	2.62	721.6	2.67	6.31	10.53
B. 20 °C, 50 % HR	752.5	2.47				
C. 20 °C, Sat.	762.5	2.44				
D. 5 °C, Sat.	684.5	2.69				
E. Lajetas de Betão – 20 °C, Sat.	661.3	3.14				

O diâmetro e o tempo médio observado no conjunto de todas as amassaduras realizadas foi de 721.6 mm e de 2.67 s, respectivamente. O coeficiente de variação obtido, diâmetro médio e tempo decorrido até à marcação do diâmetro de referência (500 mm) foi de 6.31 % e de 10.53 %, respectivamente. Os resultados obtidos pertencem à classe SF2, que respeitam o critério compreendido entre $\geq 650 \text{ mm} \leq 800 \text{ mm}$, de acordo com o documento normativo europeu: The European Guidelines for Self Compacting Concrete (EFCA, 2005).

3.3.2.3 Ensaio de escoamento no funil em V

O ensaio do funil em V pretende avaliar a viscosidade e a capacidade de enchimento do betão auto compactável (BAC). O ensaio de escoamento foi realizado de acordo com o procedimento descrito na Norma Portuguesa NP EN 12350-9 / 2010 (IPQ, 2010a), que se descreve sucintamente a seguir:

- Humedeceu-se o interior do funil com um pano húmido; posiciona-se o recipiente de recepção do betão e fecha-se a comporta inferior;
- Colocou-se no funil em V o betão, de forma contínua e sem qualquer tipo de vibração;
- De seguida, abriu-se a comporta e deu-se início à contagem do tempo utilizando um cronómetro e observa-se o movimento do betão pela parte superior do funil e

pára-se a contagem do tempo no cronómetro quando aparece no fundo do funil os primeiros raios de luz.

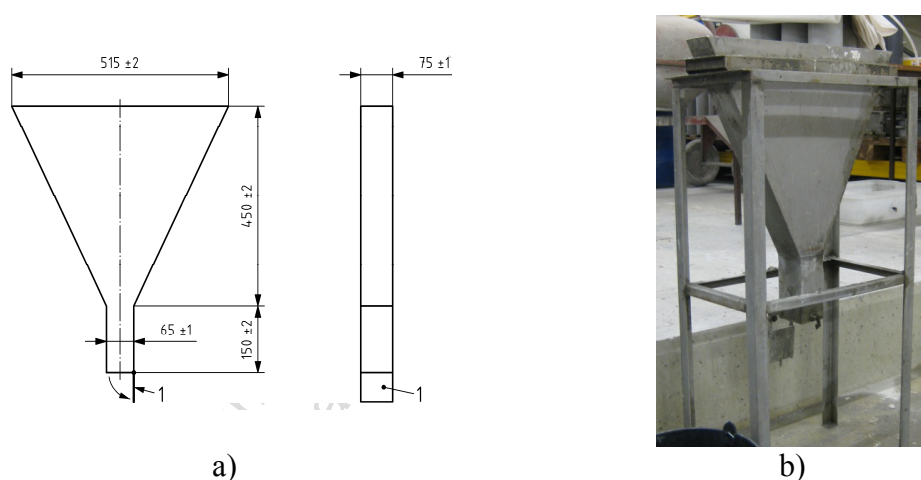


Figura 3.9 – Geometria do Funil a); b) equipamento de ensaio do funil em V.

Os resultados médios obtidos no ensaio do funil em V nas diferentes amassaduras encontram-se apresentados na Tabela 3.7, com referencia à amassadura, ao tempo observado (segundos), o tempo médio de todas as amostras analisadas, o desvio padrão e o respectivo coeficiente de variação para a série de amassaduras ensaiadas.

Tabela 3.7 – Resultados obtidos no ensaio do funil em V

Referência	t_v (s)	$t_{v.médio}$ (s)	Desvio (s)	δ (%)
A. 30 °C, Sat.	9.9			
B. 20 °C, 50 % HR	10.5			
C. 20 °C, Sat.	10.1	10.4	0.4	4.1
D. 5 °C, Sat.	11.0			
E. Modelos de Lajes	10.6			

O resultado médio observado no ensaio do funil em V, foi de 10.4 s, com um desvio padrão de 0.4 s e um coeficiente de variação de 4.1 %. O resultado do ensaio do funil em V, corresponde ao critério VF2, porque pertence ao seguinte intervalo: $\geq 7s \leq 27 s$, de acordo com o apresentado na SCCGuidelines (EFCA, 2005).

3.3.2.4 Ensaio na caixa em L

Este método de ensaio permite avaliar a auto compactibilidade do BAC fresco, por acção do seu peso próprio, através da altura alcançada pelo betão numa caixa especialmente concebida para o efeito, de modo a avaliar-se a deformabilidade do betão e a capacidade que tem para fluir sem bloquear. Os ensaios foram conduzidos de acordo com European Group Project, 2005 (EFCA, 2005).

O procedimento de ensaio adoptado com base no documento normativo supra mencionado, foi o seguinte:

- Após humedecer a caixa em L com um pano húmido, fechar o sistema de comporta;
- Colocar a amostra de betão na secção vertical (H_1), espera-se cerca de 60 s, e regista-se possíveis anomalias (segregação);
- De imediato, abre-se a comporta e espera-se que o betão flua para a secção horizontal (H_2) da Caixa em L;
- Depois de terminado o movimento do betão, efectuou-se duas medições em que uma das secções, H_1 e H_2 , respectivamente.

Na Figura 3.10, apresenta-se esquematicamente as dimensões da caixa em L e na , o pormenor dos varões que não ofereceram bloqueio à passagem do betão, e a fase em que é possível efectuar as medições das diferente alturas de betão.

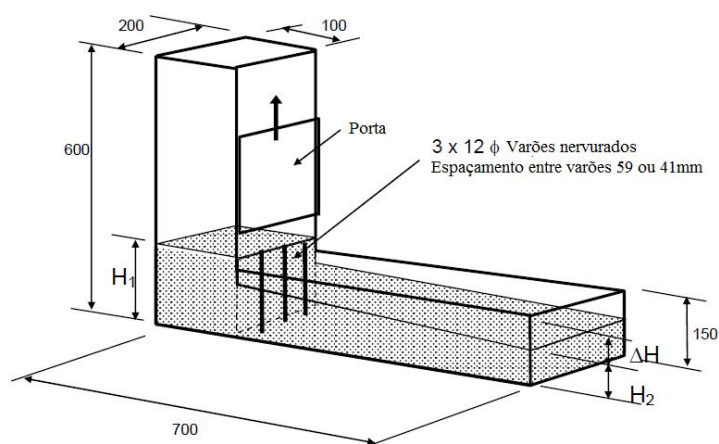


Figura 3.10 – Dimensões da caixa em L–BOX (traduzido e adaptado de (EFCA, 2005)).



a)



b)

Figura 3.11 – Aspecto geral do ensaio da caixa em L: a) decurso o ensaio; b) fase em que é possível efectuar as medições (H_1 e H_2).

A capacidade de passagem - PA é dada pela seguinte expressão:

$$PA = \frac{H_2}{H_1} \quad [3.1]$$

em que:

PA - Capacidade de passagem;

H_1 - Profundidade média de betão na secção vertical da caixa (mm) e

H_2 - Profundidade média de betão na secção horizontal da caixa (mm).

Os resultados médios obtidos no ensaio da caixa em L (L-Box) observados nas diferentes amassaduras apresentam-se na Tabela 3.8, com referência às diferentes alturas (H_1 e H_2), a capacidade de Passagem (PA) individual e o seu valor médio, o desvio padrão observado, e o respectivo coeficiente de variação.

Tabela 3.8 – Resultados dos ensaios da caixa em L

Referência	H (mm)		PA	PA (médio)	Desvio Padrão	δ (%)
	H_2	H_1				
A. 30 °C, Sat.	95.5	85.5	0.79	0.8	0.04	5.1
B. 20 °C, 50 % HR	98	73.5	0.75			
C. 20 °C, Sat.	98	78	0.80			
D. 5 °C, Sat.	100	76.5	0.76			
E. Lajetas de Betão, 20 °C, Sat.	102.5	71.5	0.70			

O resultado médio obtido no ensaio da caixa em L (L-BOX), na campanha de ensaios experimentais realizados foi de 0.8, com um desvio padrão de 0.04, e um coeficiente de variação de 5.1 %. De acordo com a norma europeia (SCCGuidelines), o resultado médio obtido no ensaio da caixa em L, pertence ao critério PA2 (≥ 0.75), respeitando satisfatoriamente o critério.

3.3.2.5 Ensaio de segregação

O ensaio de segregação foi conduzido de acordo com as recomendações descritas no seguinte documento: “Guidelines for Self Compacting Concrete” - European Group Project, 2005. Actualmente existe um projecto de norma para o ensaio de segregação – pr EN 12350-11 – Sieve Segregation. O procedimento de ensaio adoptado foi o seguinte:

- Após a conclusão da amassadura, retira-se para um balde cerca de 10 L de betão fresco, e aguarda-se cerca de 15 minutos até dar-se início ao ensaio;
- Coloca-se a base do peneiro e regista-se a sua massa – m_R (g);
- Coloca-se o peneiro de 300 mm de diâmetro e de 5 mm de abertura e tara-se o recipiente;
- De uma altura de cerca 500 mm deixa-se cair no peneiro uma amostra de betão com uma massa de aproximadamente 5 a 6 kg no peneiro, e regista-se a massa observada – m_b (g);
- Regista-se a massa do material que ficou retido na base do peneiro - m_{rs} (g).

A resistência à segregação é dada pela seguinte expressão ([3.2]):

$$RS = \frac{m_r - m_{rs}}{m_b} \times 100 \text{ (%)}$$
 [3.2]

em que:

RS - resistência à segregação (%);

m_r - massa do receptor, base do peneiro (g);

m_{rs} - massa de material que passou através do peneiro de 5 mm de abertura e ficou retido na base do receptor (g) e

m_b - massa de betão colocado no peneiro de malha quadrada de 5 mm.

Os resultados médios obtidos nas diferentes amassaduras (a partir da média de duas amassaduras), apresenta-se na Tabela 3.9, referenciando a amassadura, a resistência à segregação individual e médio, o desvio padrão, e o respectivo coeficiente de variação

Tabela 3.9 – Resistência à Segregação do BAC

Referência	RS (%)	RS médio (%)	Desvio (%)	δ (%)
A. 30 °C, Sat.	4.2	5.4	0.72	13.4
B. 20 °C, 50 % HR	6.1			
C. 20 °C, Sat.	5.6			
D. 5 °C, Sat.	5.3			
E. Lajetas de betão – 20 °C, Sat.	5.6			

De modo a poder apresentar sucintamente o resumo dos resultados médios obtidos nos ensaios do BAC fresco, e classificá-lo quanto à classe, apresenta-se na Tabela 3.10, a respectiva classe do betão auto compactável (BAC).

Tabela 3.10 – Caracterização do betão no estado fresco - BAC

Propriedade	Classificação	Critério
Ensaio de abaixamento (mm, s)	SF2 (721.60)	$\geq 640\text{mm}, \leq 800\text{ mm}$
T50 (sec.)	VS2 (2.67)	$> 2\text{ s}$
Ensaio do funil (s)	VF2 (10.4)	$\geq 7\text{ s}, \leq 27\text{ s}$
Ensaio da caixa em L (L-Box)	PA2 (0.80)	≥ 0.80 com 3 varões
Ensaio de segregação (%)	SR2	$\leq 15\%$

O betão auto-compactável (BAC), é classificado segundo os critérios definidos na SCCGuidelines (EFCA, 2005), nomeadamente no ensaio de abaixamento, SF2 e VS2, no ensaio do funil em V, VS2, no ensaio da caixa em L, PA2, e no ensaio de segregação como SR2.

3.3.3 Condições de cura

A humidade e a temperatura nas primeiras idades do betão após a moldagem são cruciais. Deve existir um controlo das condições do meio ambiente onde são colocadas as amostras, nas primeiras 24 horas, de modo a poder interpretar mais facilmente alguns dos resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica. No programa experimental, e de modo a minimizar a troca de humidade com o exterior, os provetes foram devidamente acondicionados, até à data de desmoldagem (ao final de 24 horas para todas as amassaduras). Nos provetes foram aplicados uma folha de acetato e posteriormente um azulejo, como se ilustra na Figura 3.12. No espaço laboratorial onde se fabrica o betão e onde são acondicionados as amostras até à hora de desmoldagem, é um espaço onde se consegue manter uma temperatura quase constante de 20 °C, e uma humidade relativa próxima dos 50 %.



a)

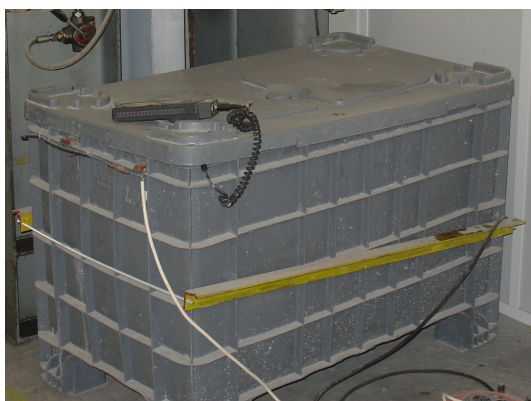


b)

Figura 3.12 – Condições de acondicionamento das espécimes a) película de acetato;
b) aplicação de azulejos.

3.3.3.1 Cura a 30 °C, ambiente saturado

Após a desmoldagem (ao final de 24 horas) os provetes foram imediatamente colocados num tanque de água com temperatura regulada a 30 °C e ambiente saturado. A temperatura de cura foi conseguida à custa de uma resistência eléctrica colocada no fundo do tanque, e com o auxílio de um termóstato que permite assegurar uma temperatura de 30 °C \pm 1 °C. De modo a poder avaliar a temperatura, foi aferida a temperatura do banho regularmente, como se ilustra na Figura 3.13.



a)



b)

Figura 3.13– a) Aspecto geral do tanque utilizada na cura a 30 °C; b) controlo da temperatura.

3.3.3.2 Cura a 20 °C, 50 % HR

Foram, também, curados provetes numa câmara climática, com temperatura e humidade relativa controlada, 20 °C e 50 %, respectivamente. Esta câmara é designada pela Unidade de Investigação - LABEST, como câmara de fluência (Figura 3.14).



Figura 3.14 – Condições de cura dos provetes curados a 20°C, 50 % HR:
a) aspecto geral das espécimes; b) controlador da câmara de fluência.

3.3.3.3 Cura a 20 °C, ambiente saturado

Os provetes foram colocados num interior de uma câmara climática com temperatura e humidade relativa controlada, 20 °C e ≥ 95 %, respectivamente, dispostos num tanque com água completamente saturados, como se ilustra na Figura 3.15. O ambiente de cura a 20 °C e ambiente saturado, é considerado neste trabalho como condição de referência.



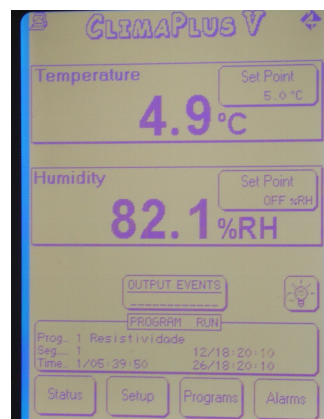
Figura 3.15 – a) Condições de cura a 20 °C e ambiente saturado; b) controlador da câmara de cura.

3.3.3.4 Cura a 5 °C, ambiente saturado

Os provetes curados a 5 °C e em ambiente saturado, foram colocados numa câmara climática Walk-In, com 3600 L de capacidade, da marca aralab. Na Figura 3.16, ilustra-se o aspecto dos provetes colocados no interior de caixas imersos em água, e o aspecto para o controlador da câmara Walk-in.



a)



b)

Figura 3.16 – Condições de cura dos provetes curados a 5 °C; a) interior da câmara; b) controlador da câmara Walk-In.

3.3.3.5 Lajetas a 20 °C, ambiente saturado

Nesta fase experimental foram betonados duas lajetas de betão, nomeadamente uma sem armadura (Lajeta A), e outra com armadura (Lajeta B), e com as seguintes dimensões: $400 \times 360 \times 200 \text{ mm}^3$ (base \times altura \times espessura). Na Figura 3.17, ilustra-se o aspecto geral das lajetas, colocadas no interior da câmara de cura após a desmoldagem (ver Figura 3.17 a), e o ambiente saturado em que estiveram submetidas (ver Figura 3.17 b), até à data do ensaio. O objectivo de betonar lajetas com e sem armadura, prende-se fundamentalmente em avaliar a influência da armadura e o efeito dos bordos nos resultados de resistividade eléctrica. Em última análise, encontrar uma relação entre a resistividade aparente (ρ_a) avaliada a partir de provetes com dimensões normalizadas, e a resistividade real (ρ_r) medida a partir de elementos com dimensões semi-infinitas.



Figura 3.17 – Aspecto geral das lajes: no interior da câmara a); ambiente saturado b).

3.4 Procedimentos e ensaios realizados

Na investigação experimental desenvolvida e de modo a atingir os objectivos inicialmente delineados, os ensaios realizados foram os seguintes: avaliação da resistividade eléctrica, utilizando diferentes técnicas de ensaio em provetes com dimensões padronizados e em lajetas com e sem armadura; avaliação da resistência mecânica à compressão em provetes cúbicos de 150 mm de aresta e determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.

3.4.1 Resistividade eléctrica

A resistividade eléctrica do betão pode ser avaliada segundo a técnica dos dois eléctrodos, por aplicação de duas chapas de aço inox colocados em faces opostas, ou utilizando a técnica dos quatro eléctrodos – Sonda Wenner. A partir da relação entre a intensidade de corrente aplicada e a diferença de potencial medida obtém-se a resistência eléctrica do material. A resistividade eléctrica é, então, obtida multiplicando a resistência eléctrica por uma constante geométrica que depende das dimensões do provete e dos eléctrodos utilizados. Nas Figuras 3.18 e 3.19, apresenta-se esquematicamente o esquema de ensaio montado para medição da resistividade eléctrica (RE), utilizando a técnica dos dois eléctrodos e a técnica dos 4-eléctrodos, respectivamente.

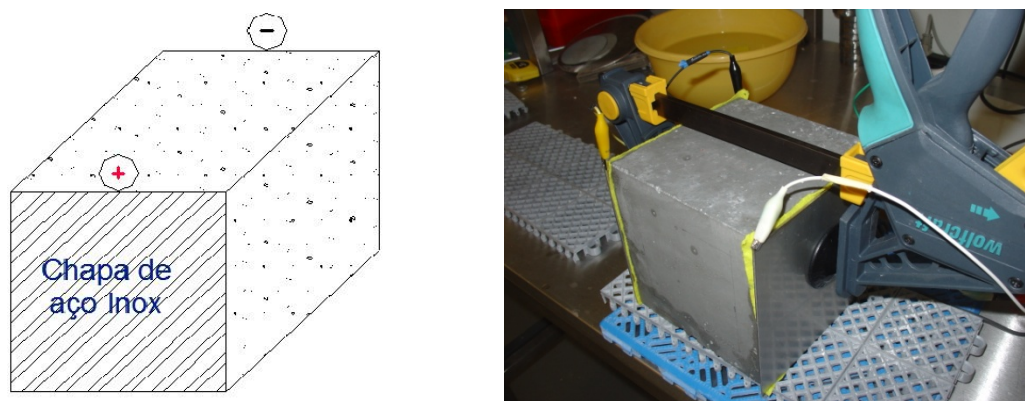


Figura 3.18 – Esquema de ensaio da RE usando a técnica dos 2-eléctrodos.

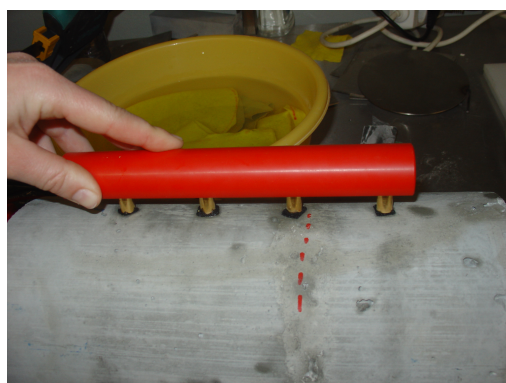


Figura 3.19 – Medição da RE usando a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner).

O procedimento de ensaio adoptado para avaliação da resistividade eléctrica (RE), utilizando a técnica dos dois eléctrodos, foi realizado de acordo com o sugerido por (Polder, 2001). Durante os testes passa uma corrente eléctrica de frequência baixa entre os dois eléctrodos, atravessando toda a amostra, enquanto a diferença de potencial é medida. Para a medição da corrente eléctrica existem duas possibilidades, utilizando uma medição em corrente alternada (CA) ou em corrente contínua (CC). A maioria das medições são geradas em corrente alternada, com uma frequência entre 50 e 1000 Hz, com uma onda geralmente sinusoidal, ou outro tipo de frequência desde que comprovada cientificamente. Medições em corrente contínua (CC) não são recomendáveis devido ao efeito de induzir a polarização dos eléctrodos, traduzindo-se em erros significativos.

No presente programa experimental, foram desenvolvidas as duas medições em corrente alternada (CA) e em corrente contínua (CC). De modo a minimizar o efeito da polarização no resultado obtido, e de modo a obter um resultado que não inclua o valor

relativo à polarização foram realizadas duas medições em direcções opostas e determinado o valor médio das duas medições.

Análise de sensibilidade dos equipamentos

Antes de dar-se início ao programa experimental propriamente dito, foi realizado um estudo de sensibilidade aos equipamentos em corrente alternada e corrente contínua. Na gama de medição de corrente alternada, percorreu-se exaustivamente as diferentes frequências disponíveis na unidade de corrente alternada, e diferentes funções, nomeadamente, função sinusoidal, quadrática e triangular, do gerador de corrente da marca Tektronic. Após o estudo preliminar concluiu-se que, para a composição de betão estudada, uma função do tipo sinusoidal com uma frequência de 10 kHz, apresentava boa reprodutibilidade ao longo do tempo, como se apresenta resumidamente no Anexo B.

3.4.2 Técnicas dos dois eléctrodos

Corrente alternada (CA)

A corrente alternada (CA) é uma corrente eléctrica que varia com o tempo, contrariamente à corrente contínua, cujo sentido permanece constante no tempo. A forma da onda da corrente alternada é sinusoidal, como se ilustra na Figura 3.20, e é considerada a transmissão de onda de energia mais eficiente. A corrente alternada é constituída por fases, enquanto a corrente contínua é constituída pelo pólo positivo e pólo negativo.

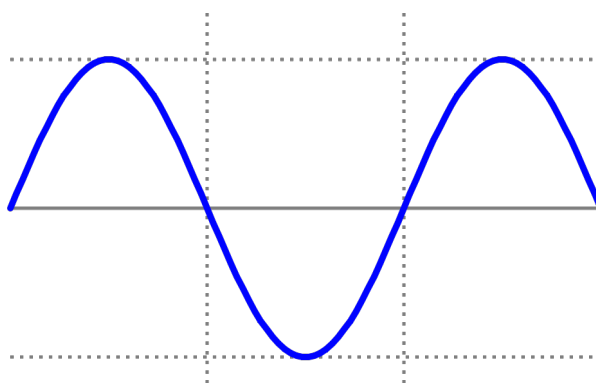


Figura 3.20 – Forma da onda em corrente alternada (CA).

Corrente contínua (CC)

A corrente contínua (CC) é o fluxo constante e ordenado de eléctrodos sempre numa direcção, e podem ser geradas de diversas formas (baterias, pilhas, baterias, células celulares e fontes de alimentação, que rectificam a corrente alternada para produzir corrente contínua, como se apresenta na Figura 3.21. Este sistema eléctrico é constituído por um pólo positivo (é polarizado) e um pólo negativo, cuja intensidade de corrente é mantida.

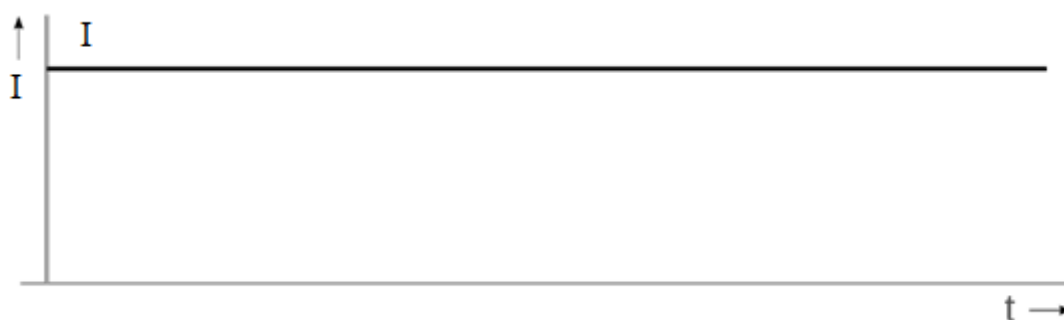


Figura 3.21 – Forma da onda em corrente contínua (CC).

3.4.2.1 Equipamentos de medição

Na medição da resistividade eléctrica utilizando a técnica dos dois eléctrodos, foram realizadas medições inicialmente em corrente alternada e imediatamente a seguir em corrente contínua. Para a medição em corrente alternada foi utilizado um gerador de corrente alterna, da marca Tektronic, modelo CFG 253, como se ilustra na Figura 3.22. O gerador de corrente alternada utilizado permite gerar ondas do tipo quadrada, triangular e sinusoidal, e permite medir frequências entre 0.03 Hz até 3 MHz. Na investigação desenvolvida o tipo de onda escolhida e a frequência foram as seguintes: onda sinusoidal e uma frequência de 10 kHz.



Figura 3.22 – Gerador de sinal em corrente alternada (CA).

Relativamente à medição em corrente contínua foi utilizada uma fonte de alimentação da marca UniVolt, modelo DT305D, como se ilustra na Figura 3.23.

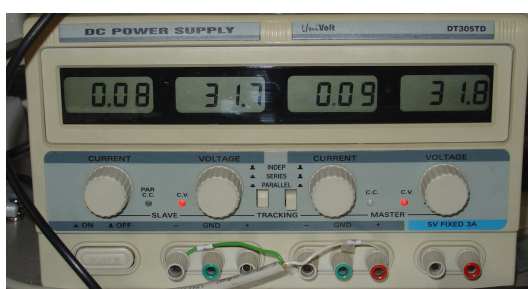


Figura 3.23 – Unidade de Corrente contínua (CC)

Em ambos os sistemas de medição, corrente contínua e corrente alternada, e de modo a poder monitorizar as medidas que se pretendem avaliar (intensidade de corrente e diferença de potencial), foram utilizados dois multímetros de elevada precisão, da marca Keithley, modelo 2000, como se ilustra na Figura 3.24. Os multímetros permitem a conexão a um computador através de portas do tipo RS-232, permitindo a monitorização das medidas em tempo real, através de uma aplicação 2000 RS-232 INTERACTIVE.

Na Tabela 3.11 apresentam-se as características mais relevantes do equipamento utilizado na medição da resistividade eléctrica usando a técnica dos dois eléctrodos.



Figura 3.24 – Pormenor dos multímetros utilizados na monitorização da resistividade eléctrica.

Tabela 3.11 – Principais características dos Voltímetros - KEITHLEY

Função	Sensibilidade	Capacidade máxima	Precisão (%)	Frequência
DC Volts	100 nV	1000 V	0.002	
AC Volts	100 nV	750 V	0.005	3 Hz-300 kHz
Ohms (2-4 Wire)	100 $\mu\Omega$	120 M Ω	0.008	-
DC Amps	10 nA	10 mA-3A	0.03	
AC Amps	1 μ A	1A-3A	0.1	3 Hz-5 kHz

No sistema de aquisição utilizado para medição da resistência eléctrica, é possível escolher o tipo de função, nomeadamente permite seleccionar se a intensidade de corrente (Amps) e a diferença de Potencial (Volts) é realizada em corrente contínua ou em corrente alternada, como se apresenta na Figura 3.25, a título de exemplo para medição em corrente contínua. No sistema de aquisição é também possível definir a frequência de aquisição. No caso de medição em corrente contínua a frequência seleccionada foi de 3 Hz, em corrente alternada a frequência foi de 300 Hz. No que diz respeito à aquisição dos dados, o sistema permite a definição do número de pontos, e a taxa de aquisição em segundos (20 pontos, aquisições de 0.5 segundos). Para o cálculo da resistividade eléctrica, selecciona-se a última aquisição, e regista-se a diferença de potencial aplicada.

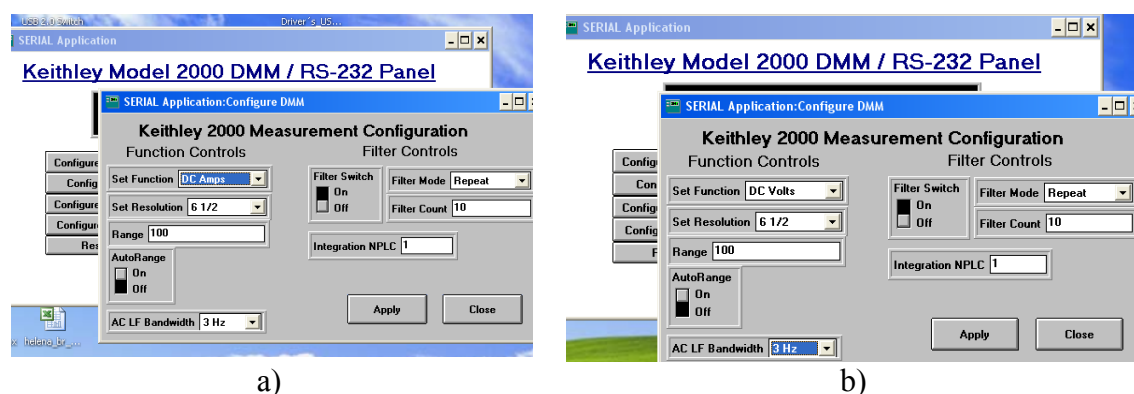


Figura 3.25 – Medição em corrente contínua (CC); a) intensidade de corrente (Amps); b) tensão aplicada (Volts).

3.4.3 Técnica dos 4-eléctrodos – Sonda Wenner

3.4.3.1 Metodologia de ensaio – provetes de betão

O método das quatro pontas – Sonda Wenner é actualmente a técnica mais utilizada para medidas de resistividade em laboratório e “in-situ”. Durante o teste, uma baixa frequência em corrente alternada (CA) é aplicada entre os dois eléctrodos exteriores, enquanto a tensão é medida nos dois eléctrodos interiores. Na investigação desenvolvida, as medidas de resistividade eléctrica foram realizadas com um equipamento da marca proceq (Torrent - Figura 3.26). O espaçamento entre os eléctrodos é de 50 mm (constante), e aplica uma frequência de 72 Hz, com uma impedância de 10 MΩ e permite a medição entre 0 – 99 kΩ.cm, com uma exactidão de ± 1 kΩ.cm. De modo a poder aferir as medições, o equipamento é constituído por uma régua de calibração, Figura 3.27, que deverá estar compreendido entre 12 ± 1 kΩ.cm.

A resistividade eléctrica aparente (ρ_a) obtida pela técnica dos 4-eléctrodos, segundo a equação [3.3], será válida para materiais homogêneos e semi-infinito.

$$\rho = \frac{2\pi a U}{I} \quad [3.3]$$

em que:

- ρ - Resistividade eléctrica (kΩ.m);
- a - Espaçamento entre os eléctrodos (m);
- U - diferença de potencial (Volts);
- I - intensidade de corrente (Amperes).



Figura 3.26 – Equipamento para medição da RE – Sonda Wenner

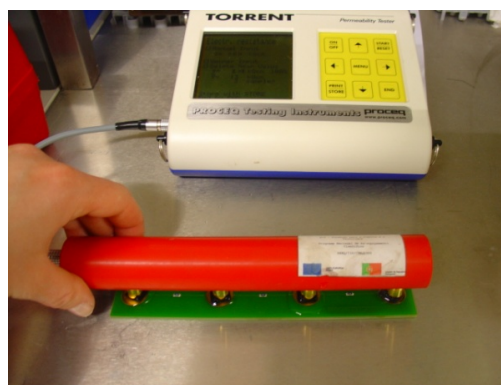


Figura 3.27 – Régua de calibração da Sonda Wenner

A medição da resistividade eléctrica utilizando a técnica dos quatro eléctrodos – Sonda Wenner, foi avaliada nos mesmos provetes em que foi realizada a medição utilizando a técnica dos dois eléctrodos, ou seja, em provetes cúbicos de 150 mm de aresta e em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. A sonda Wenner foi também avaliada em lajetas com e sem armadura.

A medição da resistividade eléctrica (RE) foi avaliada em provetes cúbicos em faces opostas entre si, e na direcção perpendicular à face do provete. A resistividade média foi obtida a partir de 12 medições, 6 medições em cada uma das faces analisadas. Em provetes cilíndricos (ϕ 150 mm e 300 de altura), foram realizadas duas leituras afastadas de 120° , sendo cada leitura constituída por três medições, assim a resistividade eléctrica média foi obtida a partir de 6 medições.

Na Figura 3.28 apresenta-se esquematicamente o esquema das medições realizadas em provetes cúbicos de 150 mm de acordo e em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro, segundo as recomendações sugeridas pela RILEM TC 154 – ECM (Polder, 2001).

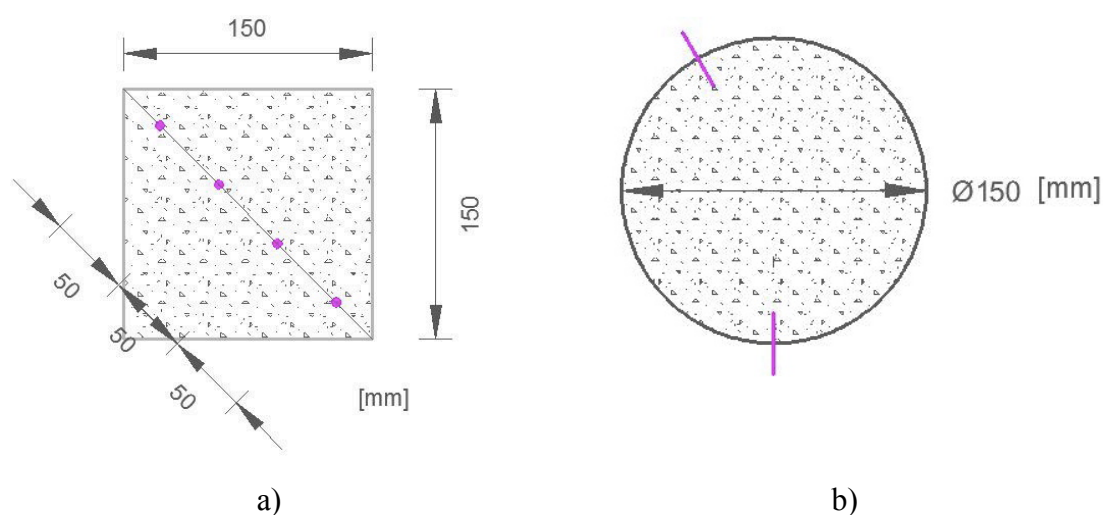
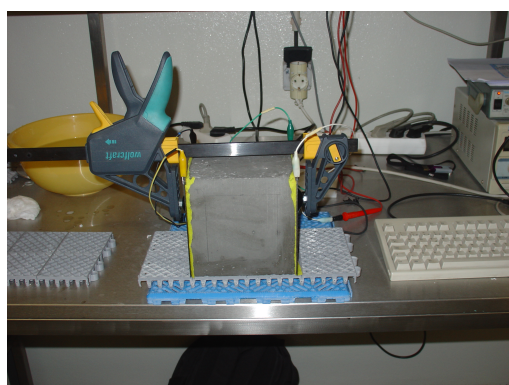


Figura 3.28 - Representação esquemática da medição da ER usando a Sonda Wenner: em provetes cúbicos a); b) provetes cilíndricos.

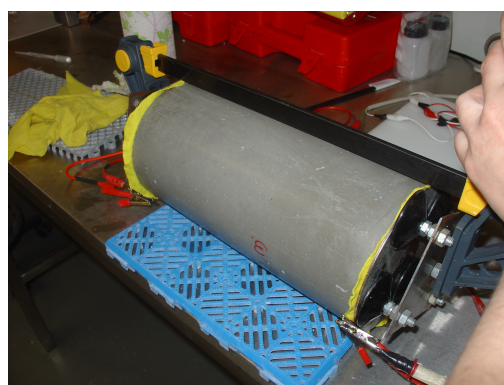
Cada uma das amostras foi retirada das condições de cura poucos instantes antes do início do ensaio de resistividade eléctrica. Cada provete foi limpo com um pano húmido para remover o excesso de água à superfície. De seguida, envolveu-se no pano húmido

uma folha de papel de cozinha, de modo a poder humedecer o papel, e retira-se a água superficial. De modo a poder garantir um bom contacto eléctrico, colocou-se um pano húmido de secção idêntica à do provete, entre a amostra e o eléctrodo, e aplicou-se um grampo que mantém uma distribuição de tensões uniforme e constante ao longo de toda a face do provete. Os eléctrodos utilizados são placas de aço inox e têm uma espessura de 1.95 mm. No grampo adaptou-se um espécie de rótula de modo a poder garantir uma distribuição perfeita da pressão em toda a secção em análise. A medição da resistividade eléctrica, utilizando as diferentes técnicas (2-eléctrodos ou 4-eléctrodos) foi avaliada em provetes cúbicos de 150 mm de aresta e em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. As primeiras medidas de resistividade eléctrica são realizadas em corrente alternada (CA) e imediatamente a seguir em corrente contínua (CC) (ver Figura 3.29).

Após a conclusão das medições usando a técnica dos 2-eléctrodos, procede-se de imediato à medição da resistividade eléctrica utilizando a técnica dos 4-eléctrodos – Sonda Wenner (Figura 3.30).



a)



b)

Figura 3.29 – Esquema geral do ensaio usando a técnica dos dois eléctrodos; a) provetes cúbicos; b) provetes cilíndricos.

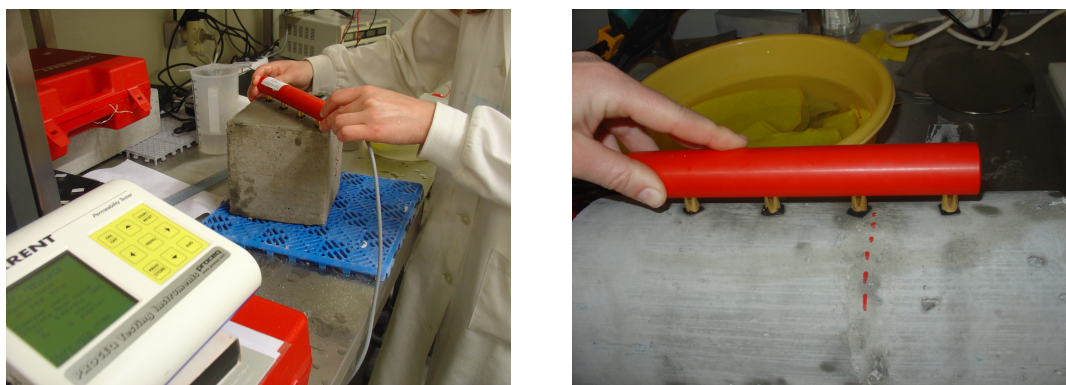


Figura 3.30 – Medição da resistividade eléctrica com a técnica dos quatro pontos, em provetes cúbicos (esquerda) e em provetes cilíndricos (direita).

3.4.3.2 Metodologia de ensaio – Lajetas

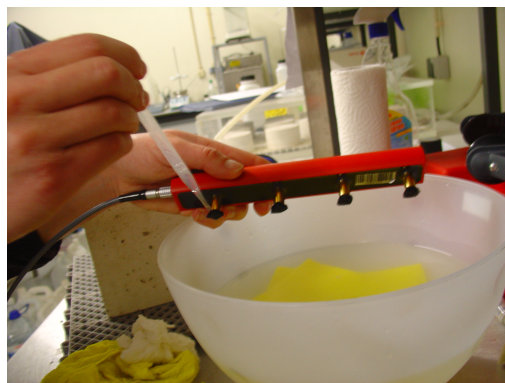
A técnica de medição de resistividade eléctrica adoptado para as lajetas foi a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner), correntemente utilizado nos casos de obra. O procedimento de ensaio foi baseado nas recomendações descritas na RILEM TC 154 – ECM (Polder, 2001), com base num procedimento de ensaio elaborado pelo Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho (Minho, 2005), (Gowers *et al.*, 1999b), e (Medeiros, 2001). A metodologia de ensaio adoptada foi a seguinte:

- I. localização das armaduras no elemento de betão, com um equipamento que permita a localização das armaduras e de recobrimento e efectuar as marcações mais relevantes na superfície do betão;
- II. garantir que o contacto das pontas do eléctrodo (esponjas) seja excelente, ou seja, as pontas devem estar saturadas, de modo a que o contacto eléctrico entre o betão e a sonda seja perfeito; humedecer regularmente as pontas da sonda durante o decurso do ensaio; este procedimento de ensaio é talvez um dos mais importantes na medição da resistividade eléctrica;
- III. a superfície do betão onde vão ser efectuadas as medições devem estar isentas de sujidade;
- IV. Humedecer a superfície caso seja necessário;
- V. Afastar sempre que possível, as medições das regiões junto à localização das armaduras, e efectuar cerca de três a quatro medições na mesma posição deslocando ligeiramente (uns milímetros) as pontas do eléctrodo entre cada leitura. Na presença de armadura e de modo a evitá-las, efectuar medições na diagonal.

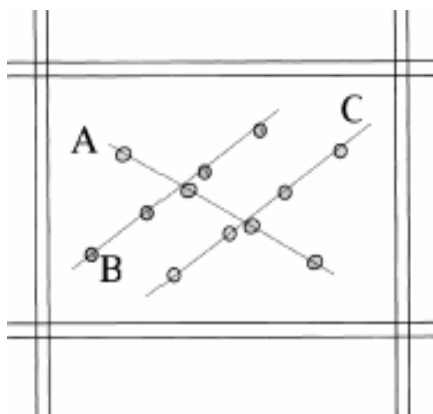
Na Figura 3.31, ilustra-se algumas das tarefas que se devem cumprir para se obter medições de resistividade eléctrica em estruturas de betão armado com reprodutibilidade.



a) localização das armaduras



b) humedecer as esponjas



c) representação esquemática para medição da resistividade eléctrica em elementos de betão armado (Polder, 2001).

Figura 3.31 – Procedimento de medição da Resistividade eléctrica em elementos de betão armado.

No programa experimental realizado moldaram-se duas lajetas com as seguintes dimensões: $400 \times 360 \times 200 \text{ mm}^3$ (base \times altura \times espessura), uma lajeta sem armadura – Modelo A e outra lajeta com armadura constituída por quatro varões de 12 mm de diâmetro ($4\phi 12$) – Lajeta B.

O objectivo do estudo da lajeta sem armadura foi avaliar a influência das condições fronteira em elementos com dimensões semi-infinitas, e comparar os resultados obtidos experimentalmente em provetes com dimensões standard, provetes cilíndricos e cúbicos, e se possível relacionar os resultados obtidos nos modelo de laje com armadura.

A lajeta sem armadura (Lajeta A) tinha uma particularidade, era constituída por duas espessuras distintas, de modo a poder aferir se a medição de resistividade eléctrica utilizando a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner) poderia ser influenciada por diferentes espessuras de betão, como se apresenta esquematicamente na Figura 3.32. A diferença de espessura foi conseguida colocando na metade da laje uma placa de poliestireno extrudido de 50 mm de espessura, como se ilustra na Figura 3.33.

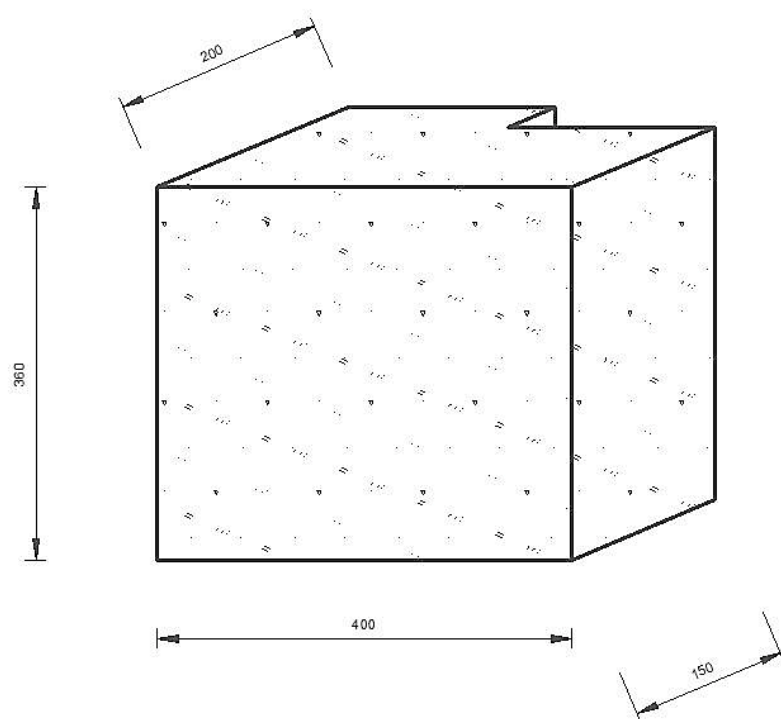
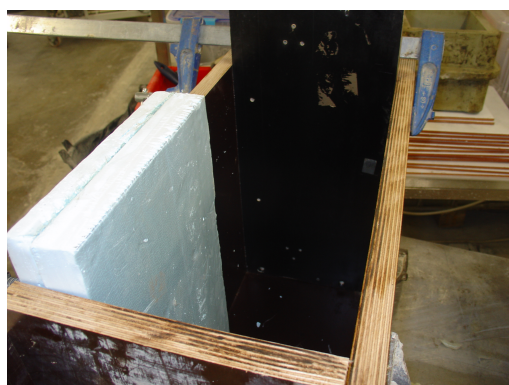
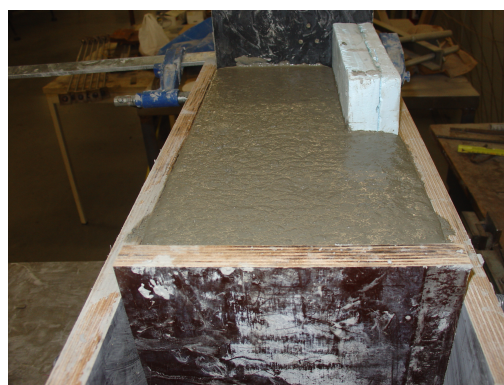


Figura 3.32 – Representação esquemática da lajeta sem armadura (Lajeta A).



a)



b)

Figura 3.33 – Aspecto geral da cofragem para a lajeta A a); pormenor da laje betonada b).

A lajeta B (com armadura) é constituída por 4 varões de aço de 12 mm de diâmetro do aço de construção A500 NR. O projecto inicial era construir uma lajeta com armadura simétrica, mas por dificuldades de execução, nomeadamente o espaçamento relativamente às faces da cofragem, isto não foi realizado. Na Figura 3.34, apresenta-se esquematicamente as dimensões do modelo com armadura (lajeta B).

Na Figura 3.35, ilustra-se o aspecto geral da cofragem utilizada no fabrico do modelo com armadura, e a fase de enchimento com betão auto-compactável (BAC), cuja composição foi apresentada na secção 3.3.2. Nos modelos (A e B) em análise foi avaliado a resistividade eléctrica usando a técnica dos 4-eléctrodos com diferentes espessuras de recobrimento. Na direcção da menor dimensão (y), foi avaliada uma espessura de recobrimento (e) de 35 mm e de 165 mm. Enquanto que na direcção (x) foi avaliada uma espessura de recobrimento de 50 mm e de 150 mm. Na Figura 3.36, apresenta-se o aspecto geral da laje no interior da câmara de cura (após desmoldagem), em ambiente controlado, temperatura de 20 °C e humidade relativa ≥ 95 %, com a representação esquemática das dimensões da lajeta B, e as distâncias da armadura à face da laje. As medições da resistividade eléctrica foram sempre realizadas no interior da câmara climática. As lajetas eram retiradas do tanque com água, e apoiadas em provetes de betão em contacto com o chão (ver Figura 3.31 a)). O procedimento de preparação de limpeza foi exactamente igual ao realizado para os provetes de betão, descrito no item 3.4.3.1.

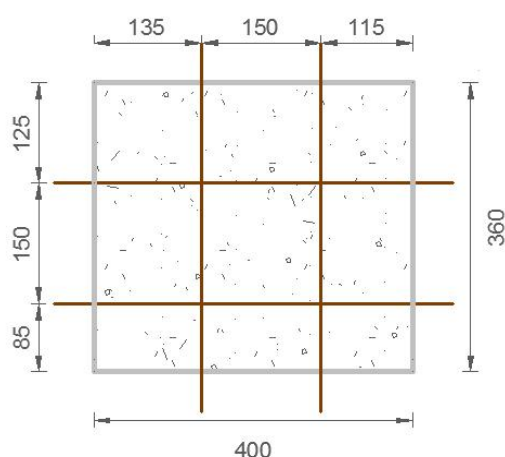


Figura 3.34 – Representação esquemática das dimensões do Lajeta B.

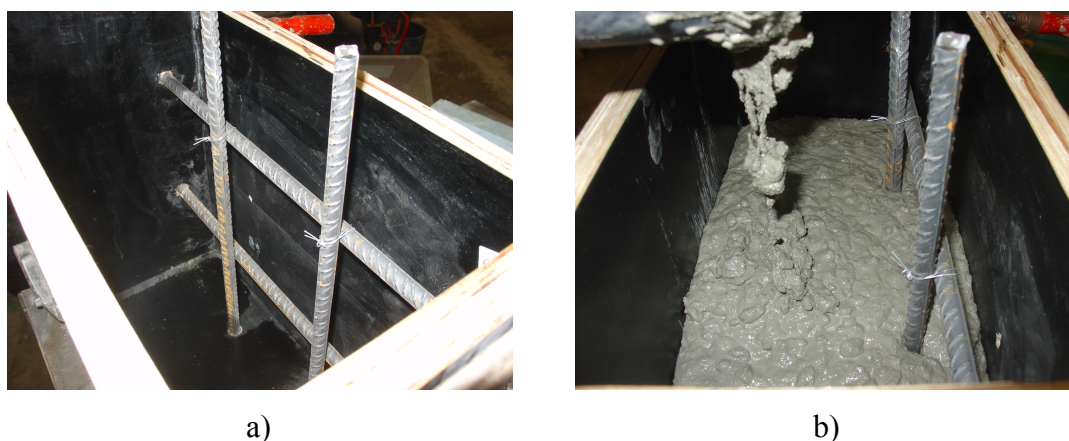


Figura 3.35 – Pormenores das armaduras do Lajeta B a); fase de enchimento b).



Figura 3.36 – Lajeta B com as dimensões esquematizadas.

3.4.4 Resistência à compressão

A progressão da resistência mecânica ao longo do tempo pode ser influenciada por diversos parâmetros como, por exemplo, o tipo de cimento, a composição química, o módulo de finura, a dosagem, as condições de amassadura e aplicação, e talvez a mais importante de todas, a temperatura e a humidade ambiente. Nas primeiras idades, a evolução da resistência mecânica pode ser muito afectada pela temperatura e pela composição do cimento.

Os ensaios para avaliação da resistência mecânica foram realizados numa prensa universal servo comandada, com capacidade máxima de 2700 kN (Figura 3.37), e conduzidos segundo a norma Portuguesa NP EN 12390-3 / 2003 (IPQ, 2003). A referida

norma estabelece a condução do ensaio em controlo de força com incrementos de carga compreendidos entre os 0.20 MPa/s a 1.0 MPa/s. Nos ensaios realizados adoptou-se o controlo por imposição de deslocamento, tendo-se fixado uma velocidade de aplicação de carga de 0.02 mm/s que corresponde a uma taxa de incremento em tensão de 0.40 MPa /s, logo dentro do intervalo estabelecido pela norma. Este valor foi estabelecido com base em experiências anteriores realizadas em vários tipos de betões, conduzidas no LABEST. A resistência mecânica foi avaliada ensaiando três amostras de provetes cúbicos de 150 mm de aresta nas seguintes idades: 1, 3, 8, 29 e 91 dias de idade. A resistência à compressão foi obtida a partir da média das três amostras ensaiadas.



Figura 3.37 – Prensa Universal MTS: a) condução de um ensaio à compressão;
b) forma de rotura observada.

3.4.5 Determinação do coeficiente de migração dos cloretos

A determinação de difusão de cloretos em provetes de betão foi realizado de acordo com a especificação do LNEC E464 / 2004 (LNEC, 2004). Os ensaios foram realizados aos 8, 29 e 91 dias de idade. Os provetes foram obtidos a partir de moldes de plástico de elevada resistência com 100 mm de diâmetro e 100 mm de altura, como se ilustra na Figura 3.38. As amostras para o ensaio foram cortados numa máquina de corte, com uma altura de 50 ± 2 mm, obtidos a partir da zona central do provete moldado.



Figura 3.38 – Aspecto geral dos provetes moldados e acondicionamento até às 24 horas.

O ensaio é constituído por duas fases distintas, uma fase de preparação, e uma segunda fase de ensaio propriamente dito. Os provetes foram retirados das condições de cura e colocados ao ambiente, durante 1 hora. Adoptou-se este procedimento para que os provetes antes de serem colocados no sistema de vácuo estivessem nas mesmas condições, como se ilustra na Figura 3.39 a).

A primeira fase é constituída pela colocação dos provetes num sistema de vácuo (Figura 3.39 b)), capaz de conseguir aplicar vácuo entre 1 a 5 kPa durante 3 horas, ao final deste período, e ainda com o sistema de vácuo em funcionamento, e durante mais 1 hora, os provetes ficam saturados numa solução de Ca(OH)_2 . Ao final deste período o sistema de vácuo é desligado e mantêm-se os provetes na solução saturada de Ca(OH)_2 durante 18 ± 2 horas. A solução catódica é uma solução de NaCl em 900g de água (destilada). Para o reservatório catódico de 12L, necessitamos de 1333.3 (g) de solução de NaCl. A face que esteve mais próxima da face de moldagem, foi a face exposta à solução de cloretos, ou seja, à solução catódica.

A solução anódica é uma solução de NaOH, 0.3 N em água destilada, aproximadamente 12 g de NaOH por cada litro de água destilada. Esta solução era preparada no dia anterior à realização do ensaio, por ser uma reacção que liberta calor, após a sua preparação esta era colocada na câmara de cura ($T=20^\circ\text{C}$, H.R. $\geq 95\%$).



a)



b)

Figura 3.39 – Aspecto geral dos provetes antes da colocação no sistema de vácuo a);
b) sistema de vácuo - colocação da solução de Ca(OH)_2 .

A segunda fase dos ensaios é constituída por colocar a amostra cilíndrica de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura no interior de uma manga de borracha de silicone de 115 mm de diâmetro exterior e com cerca 150 mm de altura. De modo a poder garantir estanquidade das amostras em análise, aplicam-se duas abraçadeiras de aço metálicas de aço inox com cerca 20 mm de espessura, devidamente ajustadas. De seguida, coloca-se na manga sobre o provete 300 ml de solução anódica de NaOH, como se ilustra na Figura 3.40.



Figura 3.40 – Colocação da solução anódica (NaOH).

Preparada todas as amostras a ensaiar (três provetes) e montado todo o esquema de ensaio, os provetes são colocados no reservatório catódico, de acordo com a representação esquemática da Figura 3.41 (nordtest method, 1991-11). De modo a evitar a colocação de um suporte plástico orientado a 32° , em cada uma das amostras, construiu-se uma caixa de contraplacado de madeira com a referida inclinação.

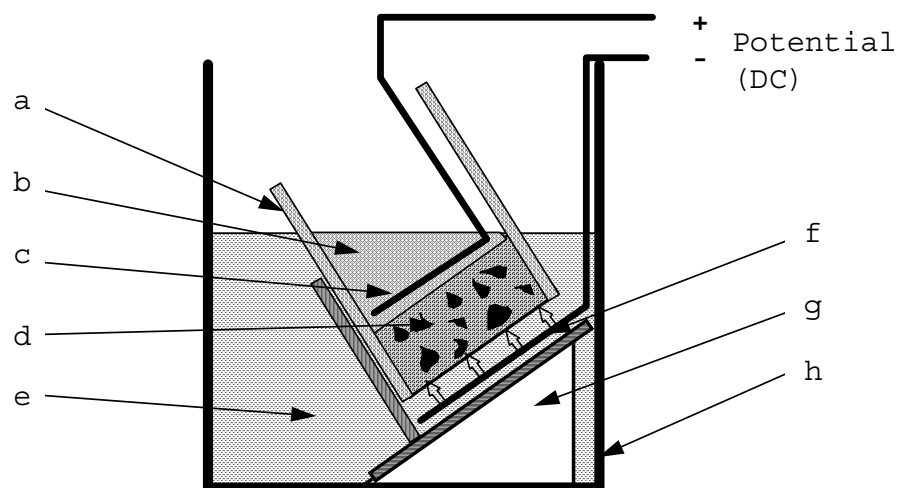


Figura 3.41 – Representação esquemática do set-up de ensaio

a – manga de borracha; b – solução anódica; c – ânodo; d – provete de betão; e – solução catódica; f – cátodo; g – suporte de plástico; h – reservatório catódico.

O sistema de aquisição das grandezas que se pretendem avaliar nomeadamente intensidade de corrente, diferença de potencial, e a temperatura da solução anódica, foi possível utilizar um sistema de aquisição da Data Taker. As medições foram realizadas com um tempo de aquisição de 5 minutos, para a duração do ensaio ($t=24$ horas).

A corrente a aplicar nas amostras, é determinada aplicando inicialmente uma corrente de 30 V, regista-se a intensidade de corrente medida, neste fase, o tempo de aquisição é de 5 s. Observando a Tabela 3.12, foi possível determinar qual a corrente a aplicar e o período de duração do ensaio. A fonte de alimentação utilizada é da marca digimess.

Tabela 3.12 – Diferença de potencial e duração do ensaio de migração

Corrente inicial (com 30 V) (mA)	Diferença de potencial aplicada U (após o ajuste) (V)	Intensidade de corrente expectável (mA)	Duração do ensaio, t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Na Figura 3.42 a) ilustra-se todo o esquema de ensaio, e na Figura 3.42 b) o pormenor da instrumentação, sensores de temperatura (cabos beges) mergulhados na solução anódica, os ânodos (cabo preto), o cátodo colocado na placa de aço inoxidável e ligado ao pólo negativo da fonte de alimentação, e o ânodo ligado ao pólo positivo da fonte de alimentação.

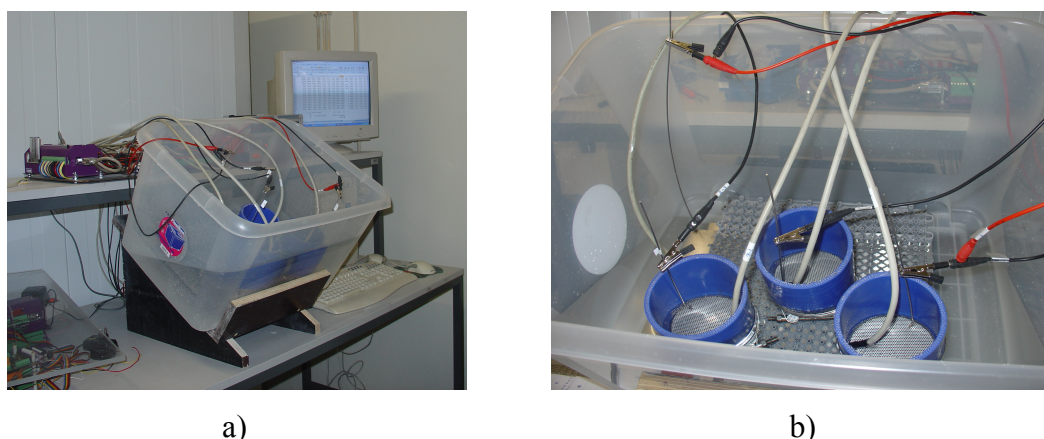


Figura 3.42 – Esquema geral do ensaio a); b) pormenor do sistema de instrumentação das amostras.

Após a conclusão do ensaio de migração em regime não estacionário, desmonta-se todo o sistema, retira-se o provete do interior da manga, lava-se o provete, e por compressão diametral secciona-se a amostra em duas partes. De seguida, pulveriza-se o provete com uma solução de Nitrato de Prata, AgNO_3 0.1 N. Durante algumas horas, coloca-se os provetes num local escuro, expondo as duas metades sob a incidência de uma luz fluorescente. Mede-se com um parquímetro a média da frente de penetração da zona branca da parte central da amostra, calculando-se sempre que possível a média das duas metades. Na Figura 3.43, apresenta-se a metodologia a seguir para medição da profundidade de penetração dos cloretos.

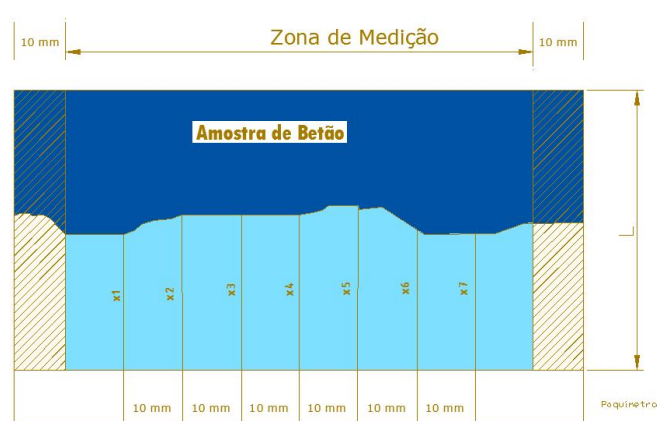


Figura 3.43 – Representação esquemática da metodologia de medição (traduzido e adaptado de (nordtest method, 1991-11)).

O coeficiente de difusão em regime não estacionário, pode ser determinado a partir da seguinte expressão [3.4]:

$$D = \frac{R \times T \times L}{z \times F \times U} \times \frac{X_d - \alpha \times \sqrt{X_d}}{t} \quad [3.4]$$

em que:

$$\alpha = 2 * \sqrt{\frac{R * T * L}{z * F * U}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 * C_d}{c_0} \right) \quad [3.5]$$

em que:

D – coeficiente de difusão (m^2/s);

z - valor absoluto do ião de valência, para iões de cloro $z = 1$;

F - constante de Faraday, $F = 9.648 \times 10^4 \text{ J (V.mol)}$;

U - valor absoluto da diferença de potencial aplicada, V (Volts);

R - constante dos gases perfeitos, $R = 8.314 \text{ J (K.mol)}$;

T - temperatura média da solução anódica, graus Kelvin;

L - espessura do provete, m;

X_d - profundidade de penetração, m;

t - duração do ensaio, em segundos;

erf^{-1} - inverso da função erro;

C_d - concentração de cloretos para a qual ocorre mudança de cor: $C_d \cong 0,07N$
para betão com cimento CEM I;

C_0 - concentração de cloretos na solução catódica: $C_0 \cong 2N$

A função erro pode ser calculada e simplificada, da seguinte forma

$\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 * 0,07}{2} \right) = 1,28$, deste modo, o coeficiente de difusão pode ser reduzido

utilizando a expressão [3.6]:

$$D = \frac{0,0239 * (273 + T) * L}{(U - 2) * T} (x_d - 0,0238) \sqrt{\frac{(273 + T) * L * x_d}{U - 2}} \quad [3.6]$$

em que:

D – coeficiente de difusão em regime não estacionário, $\times 10^{-12}(\text{m}^2/\text{s})$;

U - valor absoluto da diferença de potencial aplicada, V (Volts);

T - temperatura média da solução anódica ($^{\circ}\text{C}$);

L - espessura do provete, mm;

X_d - profundidade de penetração, mm, e

t - duração do ensaio, em horas.

3.4.5.1 Resistividade eléctrica - CTH

No ensaio de difusão, monitorizando a intensidade de corrente que passa através do provete e a medição da tensão aplicada, é possível determinar a resistividade eléctrica do betão.

Segundo (Figueiras, 2006) a resistividade eléctrica é uma capacidade intrínseca que está relacionada com a capacidade que o betão tem de transportar corrente eléctrica, que depende da sua estrutura porosa, da distribuição de água, da concentração iónica na solução intersticial e da temperatura. Deste modo, e de modo a minimizar possíveis desvios, todos os provetes devem estar sujeito às mesmas condições de ensaio. Esta medição, permite aferir a rede porosa, sendo uma excelente técnica para aferir a durabilidade do betão. A rede porosa do betão pode ser determinada comparativamente com outro ensaio, como por exemplo, o ensaio de porosimetria, porque permite estimar a distribuição do tamanho dos poros na microestrutura do material e calcular o volume de vazios.

A expressão utilizada para a determinação da resistividade eléctrica durante o ensaio de migração em regime não estacionário, é determinada de acordo com a equação [2.2]. A intensidade de corrente, a tensão aplicada, são determinados ao final ao final de 15 minutos, por considera-se que o sistema está estável. Para a determinação da resistividade eléctrica considera-se sempre os valores iniciais, porque os resultados da resistividade eléctrica são afectados pela variação da temperatura ao longo do ensaio.

3.4.5.2 Determinação rápida da permeabilidade do betão aos cloretos

A resistência à penetração dos cloretos pode ser avaliada com o ensaio “Determinação rápida da permeabilidade do betão aos cloretos” regulamentada pela ASTM C1202-1997. Este ensaio permite avaliar a quantidade de corrente eléctrica que passa através de um provete de betão com dimensões de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura, e aplicada uma diferença de potencial de 60 V durante um período de 6 horas. A carga passada através dos provetes traduz uma medida relativa da permeabilidade do betão aos cloretos, (Nunes, 2001), (Figueiras, 2006).

Na Tabela 3.13, apresenta-se uma escala elaborada por (Whiting *et al.*, 2003) onde correlaciona a carga transferida com a permeabilidade aos cloretos, em betões com diferentes relações água/ligante (a/l).

Tabela 3.13 – Penetração dos iões de cloro através da carga passada (Whiting *et al.*, 2003)

Carga passada Q (C)	Penetração de Cloretos	Relação a/l
> 4000	Elevada	> 0.6
2000 – 4000	Média	> 0.4 e < 0.6
1000 - 2000	Baixa	< 0.4
100 – 1000	Muito Baixa	Betão com selante
< 100	Desprezível	Betão com polímeros

A carga passada ou carga de Coulumb, é calculada, de acordo com a equação [3.7], a intensidade de corrente, medida em Ampere, é definida como a quantidade de carga eléctrica (Q), medida em Coulombs, que passa pela secção do provete durante um determinado tempo (t), medido em segundos.

$$Q = I \times t \quad [3.7]$$

Capítulo IV – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Considerações Gerais

A resistividade eléctrica foi aferida em provetes cúbicos e provetes cilíndricos ao longo do tempo, usando diferentes técnica de ensaio, a técnica dos 2-eléctrodos e a técnica dos 4-electrodos (Sonda Wenner), em diferentes condições de cura. A técnica dos 2-eléctrodos foi aplicada em corrente alternada (CA) e em corrente contínua (CC).

A avaliação da resistência mecânica à compressão ao longo do tempo foi avaliada em provetes cúbicos (150 mm de aresta) submetidos a diferentes condições de cura.

Ao nível do desempenho de durabilidade dos betões estudados, foi realizado o ensaio de resistência à penetração dos cloretos. Através deste ensaio foi também possível determinar a resistividade eléctrica nos primeiros instantes do ensaio.

Apresenta-se, também, uma metodologia de cálculo para previsão da resistência mecânica com base no ensaio de resistividade eléctrica obtido nas primeiras idades.

Na fase final do trabalho será apresentada, uma outra aplicação possível para medição da resistividade eléctrica em lajetas de betão com e sem armadura, usando a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner), avaliando as condições fronteira em lajetas com dimensões semi-finitas, a influência da armadura, diferentes espessuras de recobrimento.

4.2 Controlo das amassaduras

No presente programa experimental era imprescindível garantir que as amassaduras eram reprodutíveis, ou seja, as amassaduras tinham que ser iguais. O controlo foi efectuado desde o instante inicial, na fase de pesagem de todos os componentes da amassadura, na caracterização do betão no estado fresco, e também através do parâmetro de resistência mecânica e de resistividade eléctrica, efectuado às 24 horas de idades. Até às 24 horas o historial do comportamento do betão teria de ser exactamente igual. Assim, às 24 horas de idade e depois de avaliar a resistividade eléctrica em provetes cúbicos de 150 mm de aresta, realizou-se o ensaio de compressão, os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 4.1, onde é possível observar a resistência média à compressão, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Por fim, determinou-se a média de todo o conjunto das amostras analisadas às 24 horas. Na Tabela 4.2, apresenta-se o resultado médio obtido no ensaio de compressão, realizado às 24 horas, a partir de quatro amostras ensaiadas, o desvio padrão e o respectivo coeficiente de variação, da lajetas de betão. As betonagens dos provetes moldados e colocados em diferentes condições de humidade e temperatura controlada, e as lajetas de betão não foram realizados no mesmo período. Assim, optou-se por apresentar separadamente os resultados obtidos no ensaio de compressão realizado às 24 horas do modelo de lajes independente dos apresentados na Figura 4.1. A temperatura de amassadura e de cura (até à hora de desmoldagem), parece ter influenciado a evolução das reacções de hidratação nas primeiras horas, e a evolução da resistência mecânicas às 24 horas.

No presente trabalho, e para análise dos resultados obtidos experimentalmente, recorreu-se a técnicas estatísticas. Assim, utilizaram-se medidas descritivas, nomeadamente, as medidas de localização e as medidas de dispersão. Relativamente às medidas de localização, utilizou-se uma medida de tendência central, ou seja, uma média aritmética (expressão [4.1]). A média aritmética é a soma de todos os valores observados dividida pela número de amostras observadas. Nas medidas de dispersão servem para avaliar a representatividade das medidas de localização, e necessitam de uma medida de localização para termo de comparação. É o caso da variância e do desvio padrão (expressão [4.2]). A variância é a soma dos quadrados da diferença entre os valores da variável e a média, dividida pelo número total de observações.

O coeficiente de variação, C_v (expressão [4.3]), é dado pela relação, em termos percentuais, entre o desvio padrão e a média aritmética.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad [4.1]$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [4.2]$$

$$c_v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad [4.3]$$

em que:

\bar{x} - média aritmética;

x_i - resultados experimentais observados;

n - número de amostras observadas;

s - desvio padrão amostral e

C_v - coeficiente de variação.

Tabela 4.1 – Controlo de amassaduras efectuado às 24 horas – provetes moldados

Referência da Amassadura	f_{cm} (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação δ (%)
A. 30 °C, Saturado	48.757	2.496	5.120
B. 20 °C, 50 % HR	46.339	2.594	5.591
C. 20 °C, Saturado	45.097	1.780	3.946
D. 5 °C, Saturado	44.595	2.507	5.621
	46.212	-	-

Tabela 4.2 – Controlo de amassaduras efectuado às 24 horas – lajetas (A e B)

Referência da Amassadura	f_{cm} (MPa)	Desvio (MPa)	δ (%)
E. Lajetas de betão	35.597	1.419	3.986

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam-se as medições de resistividade eléctrica para o controlo de qualidade às 24 horas, usando diferentes técnicas de ensaio, para provetes com dimensões normalizadas e para lajetas de betão, respectivamente. Nas tabelas são apresentadas as referências das amostras, a técnica de ensaio utilizado (2-eléctrodos e 4-eléctrodos), o valor médio obtido na medição, e dentro de parêntesis o coeficiente de variação observado para um conjunto de três amostras ensaiadas.

Tabela 4.3 – Controlo de amassaduras efectuado às 24 horas – provetes moldados

	Resistividade eléctrica - ρ (k Ω .cm), δ (%)		
	2-eléctrodos	4-eléctrodos	
Referência da Amassadura	CA	CC	(Sonda Wenner)
A. 30 °C, Saturado	3.46 (0.03)	3.75 (0.28)	7.21 (1.09)
B. 20 °C, 50 % HR	3.26 (0.71)	3.51 (0.78)	6.75 (3.80)
C. 20 °C, Saturado	3.46 (2.45)	3.74 (2.50)	7.24 (0.72)
D. 5 °C, Saturado	3.18 (0.86)	3.43 (0.77)	6.65 (2.11)
	3.34 (4.26)	3.61 (4.49)	6.96 (4.40)

Tabela 4.4 – Lajetas - Controlo de amassaduras efectuado às 24 horas (provetes)

	Resistividade eléctrica - ρ (k Ω .cm), δ (%)		
	2-eléctrodos	4-eléctrodos	
Referência da Amassadura	CA	CC	(Sonda Wenner)
E. Lajetas de betão	3.24 (7.24)	3.54 (7.19)	6.56 (3.36)

➤ Validação de resultados

Relativamente ao controlo de qualidade das amostras às 24 horas, e por forma a poder validar os resultados experimentais, se pertencem à mesma família, aplicou-se o método de Kolmogorov – Smirnov modificado – versão proposta por Lilliefors (1967).

O procedimento de cálculo para verificação do ajuste consistiu nos seguintes passos:

1. cálculo das frequências acumuladas, $F^*_{(x_i)}$, e da função distribuição da lei teórica considerada, $F_{(x_i)}$, para todos os n valores;
2. cálculo do valor absoluto da máxima diferença:

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} |F(x_i) - F^*(x_i)| \quad [4.4]$$

3. cálculo do coeficiente de distribuição de \tilde{D} :

$$\tilde{D} = D_n \times \left(\sqrt{n} + 0.12 + \frac{0.11}{\sqrt{n}} \right) \quad [4.5]$$

Se $P(\tilde{D} < \lambda) \leq \alpha$, sendo α o nível de significância exigido, rejeita-se a hipótese da lei teórica proposta, caso contrario aceita-se. Valores para α da ordem de 0.05 são comuns para este tipo de teste.

Tabela 4.5 – Probabilidade ao afastamento máximo entre $F^*(x)$ e $F(x)$ devido aos factores aleatórios seja não inferior ao valor observado

\tilde{D}	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$P(\tilde{D} < \lambda)$	1.0			0.997	0.964	0.864
\tilde{D}	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
$P(\tilde{D} < \lambda)$	0.711	0.544	0.393	0.270	0.178	0.112
\tilde{D}	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
$P(\tilde{D} < \lambda)$	0.068	0.040	0.022	0.012	0.006	0.003
\tilde{D}	1.9	2.0				
$P(\tilde{D} < \lambda)$	0.002	0.001				

Assim, aplicou-se o método probabilístico apresentado, à resistência mecânica e à resistividade eléctrica, para as diferentes técnicas de ensaio (2-eléctrodos e a Sonda Wenner), e observou-se que, relativamente à resistência mecânica (24 horas de idade) os resultados são iguais, ou seja, pertencem à mesma família ($P=0.11957 > 0.05$), aceita-se a hipótese. Relativamente à resistividade eléctrica, observou-se um $P=0.00189$ (Sonda Wenner) e $P=0.00168$ (CA/CC), ambos menores que α , portanto rejeita-se a hipótese.

4.3 Resultado e análise dos provetes de betão

4.3.1 Resistividade eléctrica em provetes de betão

O ensaio de resistividade eléctrica foi avaliada ao longo do tempo em provetes cúbicos de 150 mm de aresta e em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, utilizando diferentes técnicas de ensaio, a técnica dos dois eléctrodos, utilizando medições em corrente alternada e em corrente contínua, e a técnica dos quatro pontos – Sonda Wenner.

Em provetes cúbicos a resistividade eléctrica foi avaliada à idade de 1, 3, 8, 29, 91 dias, em provetes cilíndricos às 24 horas, 3, 8, 15, 22, 29 e 91 dias de idade, para as diferentes condições de cura estudadas, ambiente saturado à temperatura de 30 °C, 20 °C, e 5 °C, e numa câmara climática a 20° C e 50 % de humidade relativa.

Na Tabela 4.6 e 4.7 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de resistividade eléctrica ao longo do tempo utilizando as diferentes técnicas de ensaio, método dos 2 - Eléctrodos e a sonda Wenner, com referência às condições de cura, idade em que foi realizado o ensaio, o valor médio da resistividade eléctrica e o respectivo coeficiente de variação observado, em provetes cúbicos e em provetes cilíndricos, respectivamente. O valor médio da resistividade eléctrica foi obtido a partir da medição realizada em três provetes. Como seria expectável, a resistividade eléctrica evolui com o tempo, devido ao desenvolvimento das reacções de hidratação a microestrutura do betão fica mais densa e o volume de poros conectáveis é menor.

Tabela 4.6 – Evolução da resistividade eléctrica com o tempo - provetes cúbicos

Condições de cura	Idade, t (dias)	Resistividade eléctrica - ρ_a (k Ω .cm), δ (%)		
		2 – eléctrodos		4 – eléctrodos
		CA	CC	Wenner
A. 30 °C, Saturado	1	3.46 (0.03)	3.75 (0.28)	7.21 (1.09)
	3	4.71 (0.34)	5.31 (2.84)	9.67 (3.43)
	8	5.48 (1.01)	5.93 (0.92)	10.72 (1.19)
	29	6.27 (1.27)	6.77 (1.54)	12.19 (4.34)
	91	6.75 (1.93)	7.27 (1.94)	12.82 (1.89)
B. 20 °C, 50 % HR	1	3.26 (0.71)	3.51 (0.78)	6.75 (3.80)
	3	6.60 (0.79)	6.99 (0.81)	11.92 (1.21)
	8	9.09 (7.24)	9.55 (7.05)	15.25 (9.00)
	29	15.94 (1.10)	16.25 (1.77)	23.28 (1.97)
	91	24.02 (6.26)	25.53 (5.67)	36.92 (3.97)
C. 20 °C, Saturado	1	3.46 (2.45)	3.74 (2.50)	7.24 (0.72)
	3	5.67 (2.09)	5.97 (2.94)	10.60 (2.38)
	8	6.16 (3.42)	6.61 (3.46)	11.97 (1.75)
	29	7.52 (2.64)	8.04 (2.69)	13.86 (1.82)
	91	8.71 (2.94)	9.40 (1.46)	13.85 (4.89)
D. 5 °C, Saturado	1	3.18 (0.86)	3.43 (0.77)	6.65 (2.11)
	3	6.21 (1.53)	6.63 (1.85)	11.67 (3.11)
	8	7.64 (1.98)	8.16 (1.78)	13.70 (1.46)
	29	8.99 (1.30)	9.47 (2.10)	15.41 (2.98)
	91	a)		

a) não foi possível conduzir o ensaio aos 91 dias de idade, devido à gestão programada da câmara climática, Walk-In.

Tabela 4.7 – Evolução da Resistividade Eléctrica avaliada em provetes cilíndricos

Condições de cura	Idade, t (dias)	Resistividade eléctrica - ρ (k Ω .cm), (δ %)		
		2 – eléctrodos		4 – eléctrodos
		CA	CC	Wenner
A. 30 °C, Saturado	1	-	-	7.45 (1.46)
	3	-	5.18 (1.98)	8.66 (1.46)
	8	5.60 (1.93)	6.03 (2.18)	10.08 (0.83)
	15	5.84 (0.95)	6.26 (0.88)	10.28 (2.48)
	22	6.19 (1.56)	6.65 (1.56)	11.06 (2.30)
	29	6.17 (2.61)	6.64 (2.51)	11.11 (1.73)
	91	6.73 (4.23)	7.3 (7.16)	12.39 (3.39)
B. 20 °C, 50 % HR	1	-	-	6.42 (3.80)
	3	6.36 (2.59)	6.75 (2.77)	10.61 (5.05)
	8	8.78 (1.82)	9.30 (1.87)	13.22 (4.05)
	15	10.40 (4.75)	11.00 (4.54)	14.94 (5.50)
	22	11.92 (2.45)	12.76 (2.69)	16.56 (7.42)
	29	13.56 (0.86)	14.71 (7.65)	18.37 (4.42)
	91	16.07 (4.36)	18.36 (5.28)	27.33 (7.32)
C. 20 °C, Saturado	1	-	-	6.30 (0.0)
	3	5.51 (1.16)	5.93 (1.18)	9.57 (1.54)
	8	6.33 (0.44)	6.81 (0.21)	10.83 (3.12)
	15	6.95 (0.95)	7.44 (0.97)	11.95 (0.69)
	22	7.24 (0.94)	7.72 (1.45)	12.21 (0.85)
	29	7.47 (2.09)	7.98 (2.50)	12.05 (0.68)
	91	7.57 (10.41)	8.43 (6.81)	13.08 (11.56)
D. 5 °C, Saturado	1	-	-	6.45 (1.72)
	3	-	-	12.17 (2.37)
	8	7.64 (2.15)	8.16 (1.75)	13.56 (1.46)
	15	8.57 (1.24)	9.05 (1.18)	14.78 (2.60)
	22	8.96 (2.38)	9.42 (1.91)	15.17 (5.04)
	29	8.38 (6.77)	8.59 (7.99)	15.89 (3.37)
	91	a)		

- a) não foi possível conduzir o ensaio aos 91 dias de idade, devido à gestão programada da câmara climática, Walk-In.

Observa-se, ainda, que as condições de cura, humidade e temperatura, em que são colocados os provetes de betão, influenciam o resultado da resistividade eléctrica medida. À medida que diminui a temperatura, e para as mesmas condições de humidade, aumenta a viscosidade do fluído intersticial, diminuindo a mobilidade dos iões que transporta a corrente.

Graficamente é ainda possível observar a evolução da resistividade eléctrica, em provetes cúbicos e provetes cilíndricos. Nas Figura 4.1 e 4.2, ilustra-se a evolução da RE utilizando a técnica dos 2 – eléctrodos em corrente alternada (CA), e em corrente contínua (CC), respectivamente, e na Figura 4.3, o desenvolvimento da resistividade eléctrica usando a sonda Wenner.

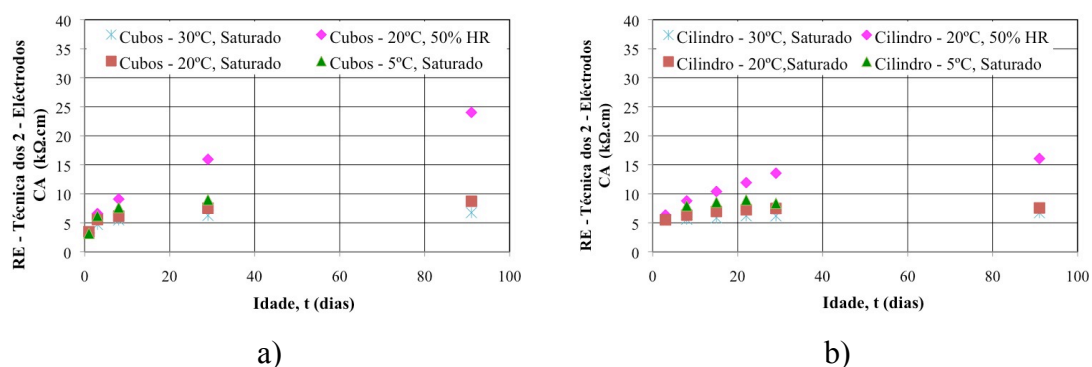


Figura 4.1 – Evolução da resistividade eléctrica (CA) em diferentes ambientes: a) provetes cúbicos (esquerda); b) provetes cilíndricos.

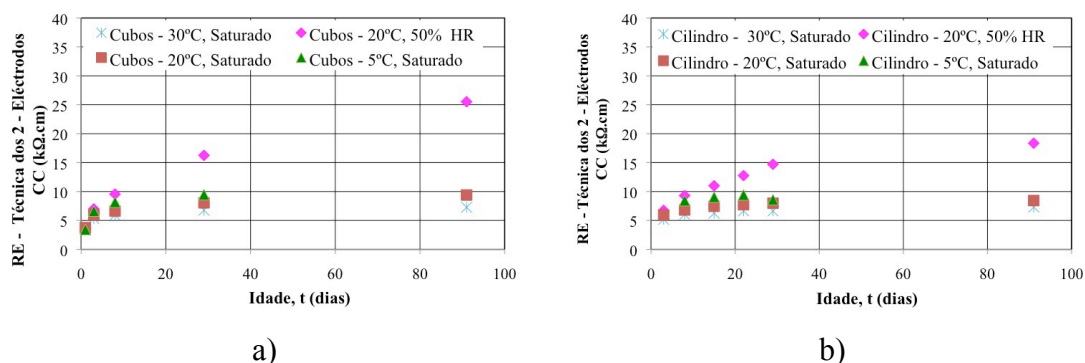


Figura 4.2 – Evolução da resistividade eléctrica (CC) em diferentes ambientes: a) provetes cúbicos (esquerda); b) provetes cilíndricos.

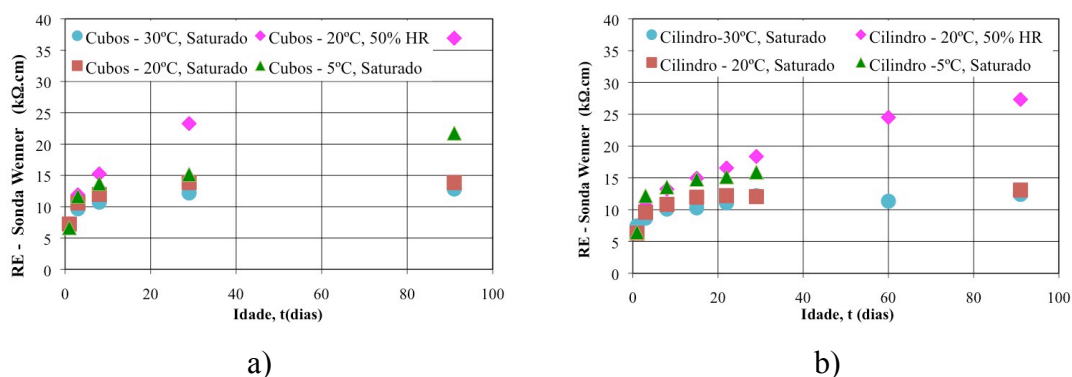


Figura 4.3 - Evolução da resistividade eléctrica (Sonda Wenner):

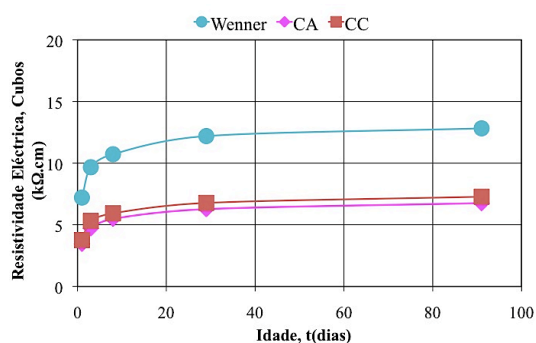
a) provetes cúbicos (esquerda); b) provetes cilíndricos.

Nas Figuras apresentadas (4.1, 4.2 e 4.3) é possível observar que a resistividade eléctrica evolui com o tempo, em provetes cúbicos e provetes cilíndricos, independente da metodologia de medição para as diferentes técnicas de ensaio. Dadas as características específicas das metodologias de ensaio CC/CA comparando com a de Wenner, os resultados são menos sensíveis à forma do provete. O CC/CA avalia a totalidade do provete enquanto que o Wenner apenas avalia uma camada superficial do provete. Assim, os resultados Wenner demonstraram maior sensibilidade para as diferentes condições de cura e geometria. Os provetes de betão curados em diferentes ambientes apresentam diferentes microestruturas, pelo que é possível justificar que a evolução do valor da resistividade eléctrica seja diferente ao longo do tempo consoante o tipo de cura utilizada.

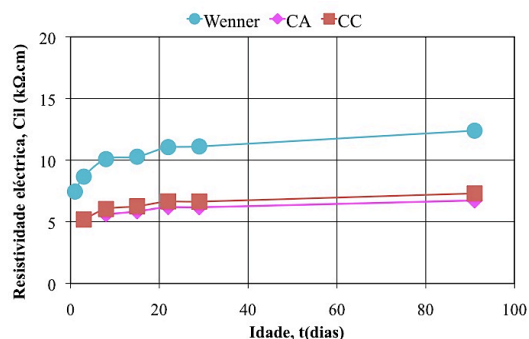
A partir dos 28 dias de idade é ainda possível observar que os provetes colocados na câmara climática Walk-In, 20 °C e 50 % de humidade relativa, a resistividade eléctrica evolui bastante, comparativamente com as diferentes condições de cura, isto poderá ser justificado pela perda de humidade da amostra analisada. Devido à diminuição da quantidade de água presente nos poros do betão que transporta a corrente, resulta um aumento da medição da resistividade eléctrica. Da análise dos resultados apresentados nas figuras (4.1, 4.2 e 4.3), observa-se que a geometria da amostra analisada influencia o valor da resistividade eléctrica. No presente programa experimental e para a composição de betão auto - compactável (BAC) utilizada, nota-se que o valor da resistividade eléctrica é mais elevada em provetes cúbicos comparativamente com a medição realizada em provetes cilíndricos, justificada pelas

condições fronteira das diferentes amostras analisadas, devido às linhas de fluxo de corrente que se formam entre os eléctrodos.

Uma outra conclusão que pode ser retirada do presente programa experimental é que existem diferenças significativas entre a técnica dos 2 - eléctrodos e a Sonda Wenner (4-eléctrodos), no entanto, observa-se uma boa correlação entre as duas técnicas de ensaio, e que ambas as técnicas parecem ser influenciadas pelos mesmos factores (microestrutura, tortuosidade da rede porosa, etc). O desenvolvimento da resistividade eléctrica usando as duas técnicas de ensaio, técnica dos 2-Eléctrodos (CA, CC) e a Sonda Wenner, ilustra-se nos diagramas das figuras seguintes, para provetes cúbicos e provetes cilíndricos. Nas Figuras 4.4 e 4.5 apresenta-se a evolução da resistividade eléctrica dos provetes curados em ambiente saturado a 30 °C e 20 °C e 50 % de HR, respectivamente. Nas figuras 4.6 e 4.7 apresenta-se a evolução da resistividade dos provetes em ambiente saturado 20 °C e 5 °C, respectivamente. Nas condições de cura a 5 °C e ambiente saturado não foi possível dar continuidade aos ensaios, por motivos de gestão de utilização da câmara climática Walk-In.

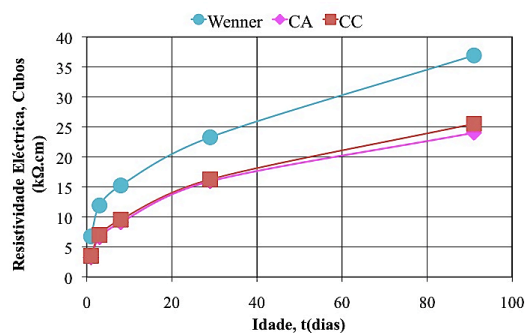


a)

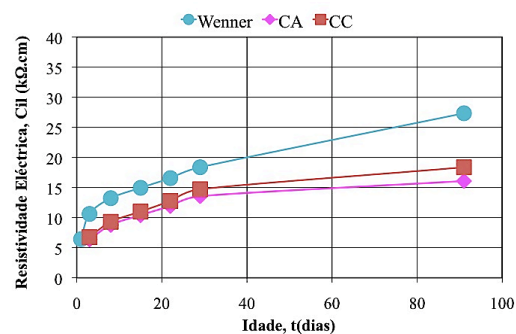


b)

Figura 4.4 - Evolução da RE de provetes curados em ambiente saturado a 30 °C: a) provetes cúbicos; b) provetes cilíndricos.

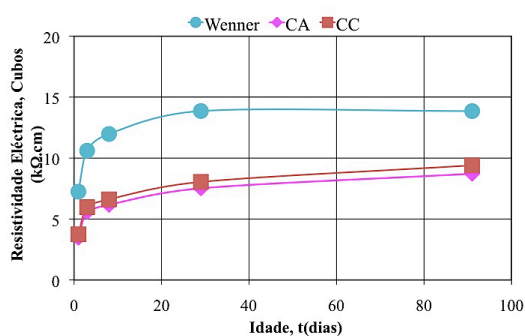


a)

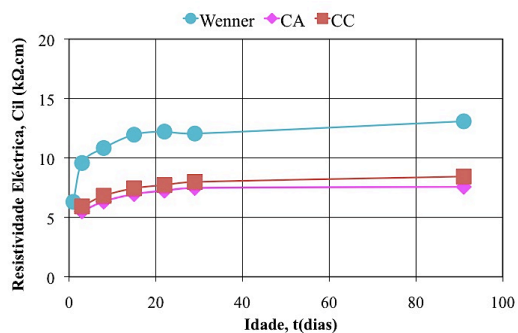


b)

Figura 4.5 - Evolução da RE de provetes curados a 20 °C e 50 % HR: a) provetes cúbicos; b) provetes cilíndricos.

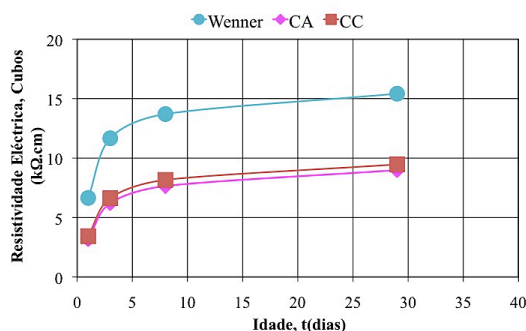


a)

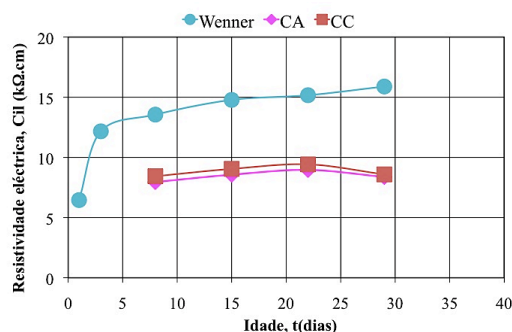


b)

Figura 4.6 - Evolução da RE de provetes curados a 20 °C e ambiente saturado: a) provetes cúbicos; b) provetes cilíndricos.



a)



b)

Figura 4.7 - Evolução da RE de provetes curados a 5 °C e ambiente saturado:

a) provetes cúbicos; b) provetes cilíndricos.

Da análise das Tabelas (4.6 e 4.7) e nas Figuras (4.4, 4.5, 4.6 e 4.7) apresentadas observa-se que o resultado da resistividade eléctrica avaliada em provetes cúbicos utilizando a sonda Wenner apresenta resultados mais elevados comparativamente com os resultados obtidos em provetes cilíndricos, salvo raras excepções, observadas às 24 horas de idade. As diferenças observadas podem ser justificadas pelas condições fronteiriças apresentadas pelos provetes relativamente ao posicionamento dos eléctrodos. Nos provetes cúbicos, o facto dos eléctrodos mais exteriores da sonda Wenner se encontrarem muito próximo da extremidade do provete, altera as linhas de fluxo de corrente no provete, podendo afectar o valor da resistividade eléctrica medido.

Na Figura 4.8 apresenta-se a correlação encontrada utilizando a técnica dos quatro pontos e a técnica dos dois eléctrodos exteriores (CA/CC). Analisando os resultados obtidos pelos diferentes métodos, utilizando a sonda Wenner e a técnica dos 2-eléctrodos exteriores (CA/CC), observa-se que, as medições da resistividade eléctrica usando a sonda Wenner é mais elevado, aproximadamente 45.7% (CA) e de 41.97% (CC) avaliada em provetes cúbicos. A mesma tendência se observa em provetes

cilíndricos, as medições da resistividade eléctrica utilizando a sonda Wenner é mais elevado comparativamente com a medição utilizando a técnica dos 2-eléctrodos, cerca de 67% (CA) e de 55% (CC).

Da análise dos resultados utilizando a técnica de ensaio dos 2-eléctrodos, em corrente alternada (CA) e em corrente contínua (CC), observa-se que, o valor da resistividade eléctrica em corrente alternada é mais baixa comparativamente com a medição em corrente contínua, cerca de 7.17% em provetes cúbicos e de 6.71 % em provetes cilíndricos.

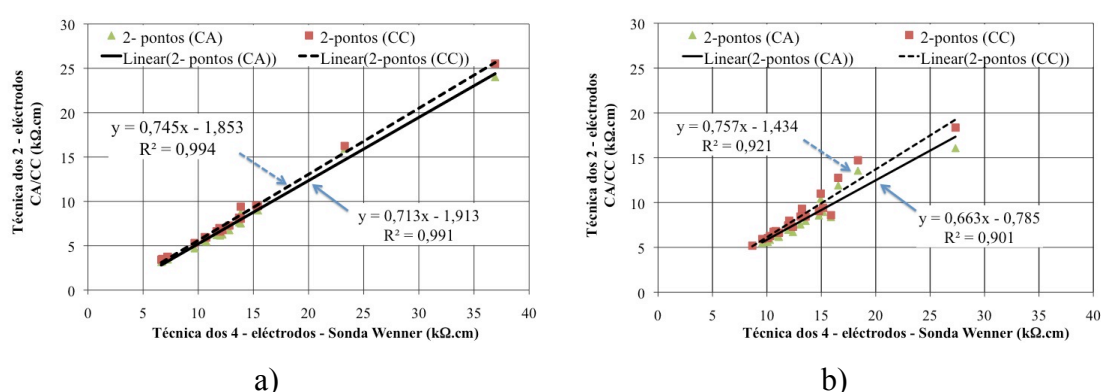


Figura 4.8 – Correlação obtida nas medições de RE através da sonda Wenner e o método dos 2-eléctrodos: a) para provetes cúbicos; b) provetes cilíndricos.

4.4 Resistência à compressão

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica obtido às diferentes idades (1, 3, 8, 29, 91 dias de idade), apresentam-se na Tabela 4.8, com a indicação das diferentes condições de cura a que os provetes estiverem sujeitos, a idade do ensaio, o número de amostras ensaiadas, a massa volúmica do betão endurecido, a tensão média de rotura à compressão, o coeficiente de variação observado, e a tensão de rotura característica definido pelo Eurocódigo (IPQ, 2008).

Na Figura 4.9, apresenta-se a evolução da tensão de rotura ao longo do tempo, observada para as diferentes condições de cura, e na Figura 4.10, o traçado dos diagramas tensão/extensão aparente, obtido a partir do transdutor indutivo de deslocamento interno, no ensaios à compressão, para duas condições de cura, 30 °C e 5 °C em ambiente saturado, observada aos 29 dias de idade.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaio à compressão simples de provetes cúbicos

Condição de Cura	Idade do ensaio	N.º de provetes	φ betão (kg/m ³)	$f_{cm, cubos}$ (MPa)	Desvio (MPa)	Coef. Var δ (%)
A. 30 °C, Saturado	1 dia	3 cubos	2348.44	48.76	2.50	5.12
	3 dias	3 cubos	2362.77	60.88	3.58	5.88
	8 dias	3 cubos	2372.15	73.18	3.48	4.76
	29 dias	3 cubos	2370.57	72.03	3.95	5.49
	91 dias	3 cubos	2339.26	75.14	3.32	4.42
B. 20 °C, 50 % HR	1 dia	3 cubos	2375.21	46.34	2.59	5.59
	3 dias	3 cubos	2386.96	63.77	4.56	7.15
	8 dias	2 cubos	2356.74	63.61	-	a)
	29 dias	3 cubos	2369.58	72.06	6.30	8,75
	91 dias	3 cubos	2335.90	76.95	2.15	2.80
C. 20 °C, Saturado	1 dia	3 cubos	2384.40	45.10	1.78	3.95
	3 dias	3 cubos	2391.31	59.312	5.99	10.10
	8 dias	3 cubos	2410.57	62.87	3.72	5.92
	29 dias	2 cubos	-	64.93	-	a)
	91 dias	2 cubos	2381.19	76.12	-	-
D. 5 °C, Saturado	1 dia	3 cubos	2371.36	44.60	2.51	5.62
	3 dias	2 cubos	2390.02	58.11	-	a)
	8 dias	3 cubos	-	62.88	3.14	4.99
	29 dias	3 cubos	2409.88	73.36	4.68	6.38

a) um dos resultados obtidos no ensaio à compressão foi desprezado, por se distanciar do valor médio, e por se observarem formas de roturas insatisfatórias.

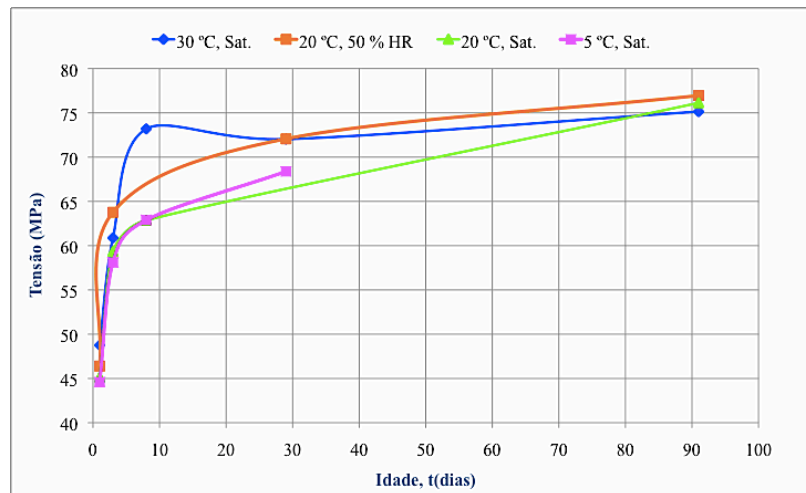
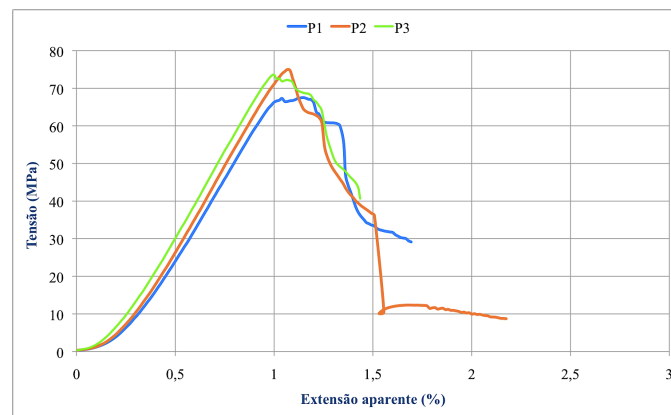
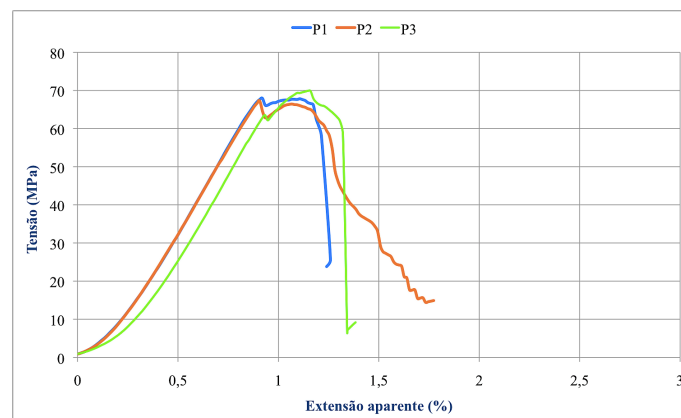


Figura 4.9 – Diagrama tensão / idade observada em cada uma das condições de cura estudadas.



a)



b)

Figura 4.10 – Diagramas Tensão / Extensão obtidos aos 29 dias de idade:
a) 30 °C , Saturado; b) 5 °C, Saturado.

Da análise da Tabela 4.8 e dos diagramas apresentados nas figuras 4.9 a 4.10, dos resultados obtidos experimentalmente nos ensaios de compressão, observam-se resistências elevadas, justificada pela compacidade das composições BAC, promovida pela utilização de uma maior quantidade de finos, a melhor ligação entre a matriz cimentícia e o agregado, e as baixas relações água/ligante ($a/l=0.41$). Para a cura a 30 °C e ambiente saturado, aos 3 dias de idade, obtêm-se um aumento significativo de resistência, aproximadamente 20 % comparativamente com a resistência média obtida aos 8 dias de idade, justificado pela temperatura de cura a que esteve sujeito. Para a cura a 5 °C e ambiente saturado, observa-se um aumento de resistência significativo dos 8 dias para os 29 dias de idade, aproximadamente 16.7 %. Os resultados obtidos aos 91 dias de idade, parecem convergir para o mesmo resultado, aproximadamente 76 MPa.

4.5 Maturidade

No presente programa experimental, colocaram-se os provetes em diferentes condições de cura em ambiente saturado a 30 °C e 5 °C, e em condições de referência a 20 °C, saturado. Nas Tabelas 4.9 e 4.10, apresenta-se a idade à data do ensaio e a data equivalente nas condições de cura a 30 °C e 5 °C em ambiente saturado, respectivamente, de acordo com a expressão [A.3].

Tabela 4.9 – Idade equivalente para cura a 30 °C e $T_{ref.} = 20$ °C

Idade do ensaio (t , dias)	Idade equivalente: $t_{eq.}$ (20 °C)
1	1.57
3	4.70
8	12.53
29	45.42
91	142.53

Tabela 4.10 – Idade equivalente para cura a 5 °C e $T_{ref.} = 20$ °C

Idade do ensaio (t , dias)	Idade equivalente: $t_{eq.}$ (5 °C)
1	0.48
3	1.43
8	3.82
29	13.86

Na Figura 4.11, apresenta-se um diagrama com os resultados obtidos experimentalmente em provetes cúbicos de 150 mm de aresta, e os resultados corrigidos da idade equivalente, obtidos a partir das expressões apresentadas no Eurocódigo para correcção à temperatura de referência, 20 °C, de acordo com a equação [A.3] e de acordo com a evolução da resistência mecânica à compressão obtida aos 28 dias de idade (equação [A.4]), em função do tipo de cimento utilizado, de acordo com a expressão apresentada em [A.5].

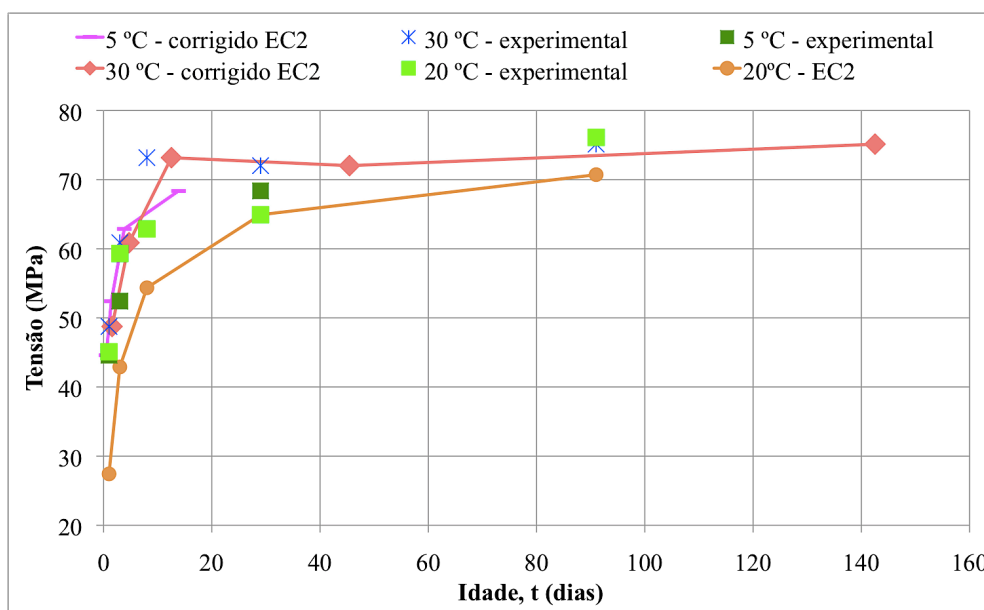


Figura 4.11 – Evolução da resistência mecânica, à idade do ensaio e idade equivalente.

Analisando o diagrama da Figura 4.11, observa-se que as expressões apresentadas no Eurocódigo (IPQ, 2008), não se ajustam bem aos resultados experimentais para a composição estudada, subestimado a evolução da resistência mecânica à compressão.

4.6 Resistência à penetração de cloretos

A resistência à penetração dos cloretos foi avaliada através do ensaio descrito na especificação do LNEC E463 (LNEC, 2004). Os ensaios foram realizados em amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Através do ensaio de penetração dos cloretos é possível ainda determinar a resistividade eléctrica, de acordo com a expressão [2.2], ao final de 15 minutos.

Na Tabela 4.11 apresenta-se para as diferentes condições de cura, a idade do ensaio, a resistividade eléctrica e o respectivo coeficiente de variação. Na avaliação da resistividade eléctrica usando o *set-up* do ensaio de migração, observaram-se excelentes correlações com a técnica dos dois eléctrodos, como será apresentado na secção 4.8.

Tabela 4.11 – Avaliação da resistividade eléctrica através do ensaio de difusão

Condições de cura				
	30 °C , Saturado	20 °C , 50 % HR	20 °C , Saturado	5 °C , Saturado
Idade, t (dias)	Resistividade Eléctrica, ρ (k Ω .cm), δ (%)			
8	8.25 (3.18)	7.28 (3.78)	7.36 (6.20)	5.73 (8.24)
29	9.02 (5.11)	9.06 (3.98)	7.88 (3.56)	5.96 (3.57)
91	9.45 (1.35)	9.71 (3.05)	8.23 (4.06)	-

Da análise da Tabela 4.11, observa-se que existe uma evolução da resistividade eléctrica ao longo do tempo, para as diferentes condições de cura. A oportunidade de determinar a resistividade eléctrica a partir do ensaio de difusão ρ_{CTH} , e para o tipo de betão utilizado, parece ser uma excelente técnica para aferir adicionalmente mais um parâmetro de durabilidade, a partir de um único ensaio. Nos resultados obtidos experimentalmente, observaram-se boas correlações com as diferentes técnica de ensaio, nomeadamente com a técnica dos 2-eléctrodos e a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner), avaliada em provetes cúbicos de 150 mm de aresta, com um ajuste linear superior a 0.9 (como se apresenta no item 4.8), à excepção da condição de cura a 5 °C e ambiente saturado.

Na Tabela 4.12 apresenta-se para as diferentes condições de cura estudadas, o procedimento adoptado para avaliação da tensão a aplicar durante um determinado período de tempo, para determinação do coeficiente de difusão em regime não estacionário. Assim, apresenta-se a condição de cura, a idade do ensaio, a intensidade de corrente medida (mA) para uma tensão constante de 30V, o intervalo admissível de intensidade de corrente, a tensão a aplicar durante um período de tempo.

Nas Tabelas 4.13 e 4.14 e para as mesmas amostras onde foi determinado a resistividade eléctrica, determinou-se a profundidade média de penetração de cloretos e do coeficiente de difusão aparente (D_{ns}), segundo a especificação do LNEC E 463 / 2004 (LNEC, 2004). A profundidade de penetração média (x_d) dos iões de cloro é possível por um processo calorimétrico, aplicando uma solução de nitrato de prata sobre as superfícies de fractura dos provetes abertos por compressão diametral. O coeficiente de difusão foi determinando recorrendo à expressão [3.6].

Tabela 4.12 – Diferença de potencial e duração do ensaio de migração

Condição de cura	Idade, t (dias)	Intensidade inicial (30 V)	I _{30 V} (mA)	Tensão aplicada (V)	Duração do ensaio (horas)
A. 30 °C, Saturado	8	59.76	40 ≤ I ₀ < 60	30	24
	29	51.73			
	91	50.78			
B. 20 °C, 50 % HR	8	62.47	60 ≤ I ₀ < 90	25	24
	29	59.82	40 ≤ I ₀ < 60	30	
	91	50.29			
C. 20 °C, Saturado	8	66.51	60 ≤ I ₀ < 90	25	24
	29	50.36	40 ≤ I ₀ < 60	30	
	91	59.46			
D. 5 °C, Saturado	8	87.57	60 ≤ I ₀ < 90	25	24
	29	80.21		25	
	91	-		-	

Tabela 4.13 – Profundidade média de penetração dos cloretos

Condições de cura				
	A. 30 °C, Saturado	B. 20 °C, 50 % HR	C. 20 °C, Saturado	D. 5 °C, Saturado
Idade, t (dias)	Profundidade média (mm), δ (%)			
8	24.34 (3.45)	20.04 (3.66)	21.70 (1.94)	25.55 (0.62)
29	19.86 (1.50)	19.58 (5.29)	21.81 (3.85)	22.39 (2.42)
91	21.90 (2.66)	19.31 (1.48)	20.74 (8.11)	-

Tabela 4.14 – Coeficiente de difusão do ião cloro

Condições de cura				
	A. 30° C, Saturado	B. 20° C, 50 % HR	C. 20 °C, Saturado	D. 5 °C, Saturado
Idade, t (dias)	Coeficiente de Difusão, D_{ns} (1×10^{-12} m ² /s)			
8	10.99 (3.18)	11.16 (3.59)	12.24 (3.23)	14.34 (0.52)
29	9.38 (1.75)	10.04 (2.44)	10.04 (2.44)	12.84 (0.81)
91	10.22 (2.01)	8.72 (0.59)	9.42 (7.08)	-

Da análise da tabelas (4.13 e 4.14) observa-se que a profundidade média de penetração de cloretos diminui ao longo do tempo, conduzindo a um coeficiente de difusão aparente ligeiramente mais baixo.



Figura 4.12 – Avaliação da Profundidade de penetração dos cloretos.

Como já foi referido na secção 3.4.5 foi possível monitorizar a evolução da temperatura, da tensão aplicada e da variação de intensidade de corrente, durante a duração do ensaio. Observou-se que, a temperatura ao longo do ensaio aumenta, devido à passagem da tensão aplicada. Este aumento de temperatura faz baixar a intensidade de corrente ao longo do ensaio. À medida que a temperatura aumenta, aumenta a viscosidade do fluído e consequentemente há uma diminuição da resistividade eléctrica. Nos diagramas seguintes apresenta-se, para os 29 dias de idade, a evolução da resistividade eléctrica e da temperatura, para as diferentes condições de cura, 30 °C saturado (Figura 4.13), 20 °C e 50 % de humidade relativa (Figura 4.14), 20 °C e ambiente saturado (Figura 4.15), 5 °C e ambiente saturado (Figura 4.16).

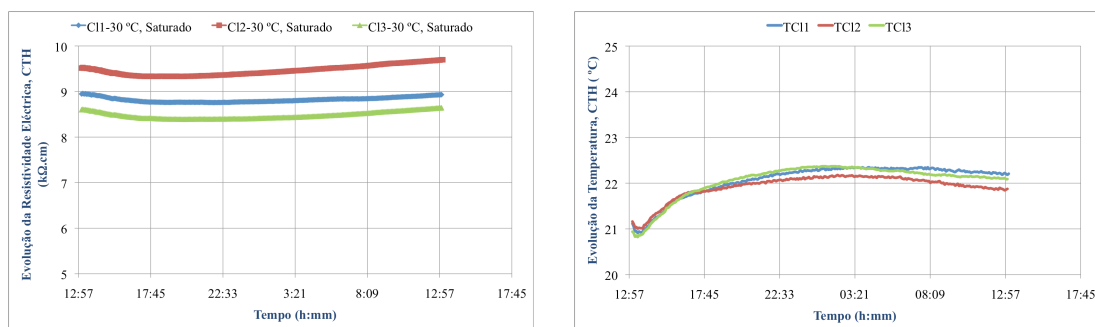


Figura 4.13 – Evolução da RE e da temperatura ao longo do ensaio CTH, 30 °C e ambiente saturado.

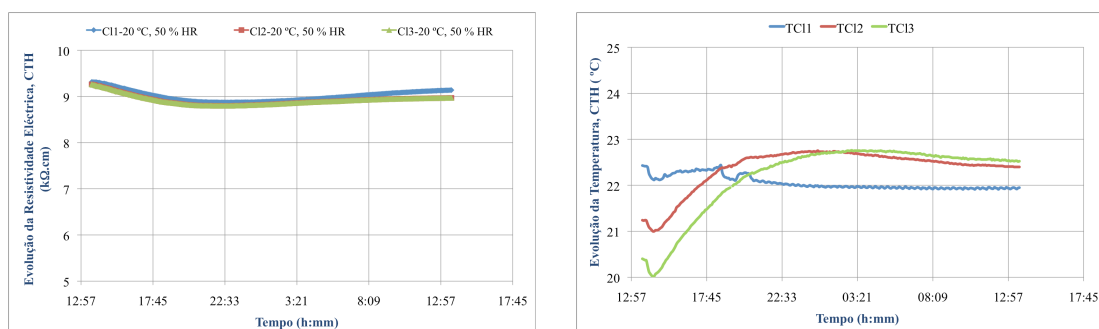


Figura 4.14 – Evolução da RE e da temperatura ao longo do ensaio CTH, 20 °C e 50 % HR

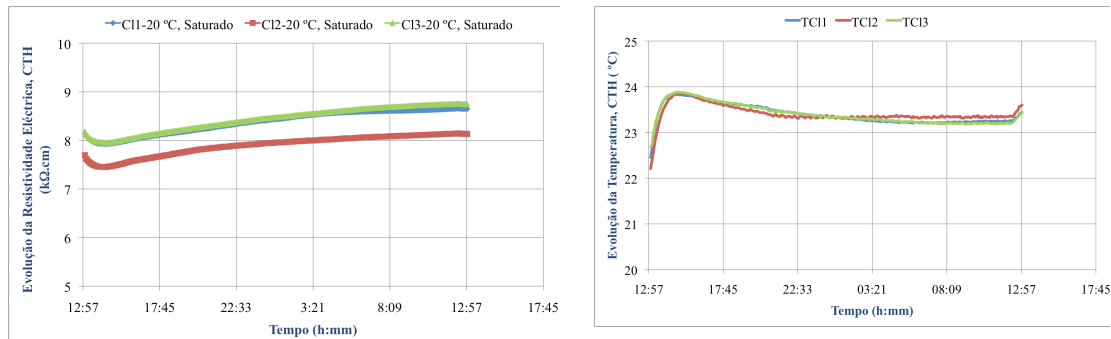


Figura 4.15 - Evolução da RE e da temperatura ao longo do ensaio CTH, 20 °C e ambiente saturado.

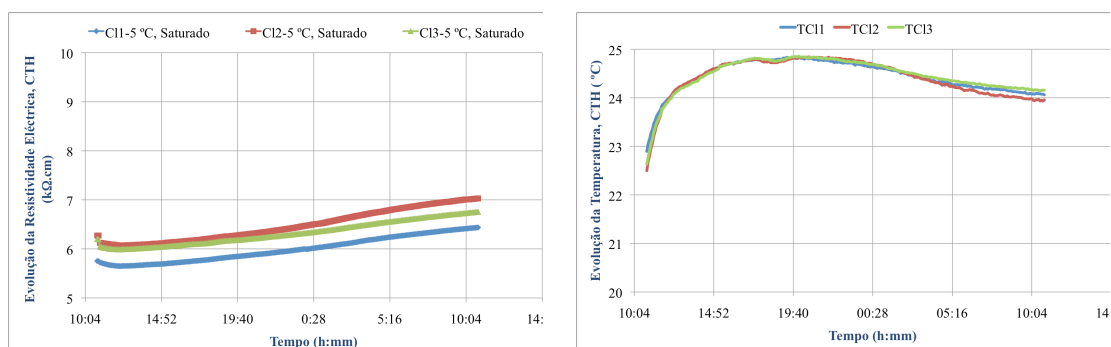


Figura 4.16 - RE e temperatura ao longo do ensaio CTH, 5 °C, Saturado.

4.6.1 Ensaio para determinação rápida da permeabilidade do betão aos cloretos

No ensaio de migração em regime não estacionário é possível ainda determinar a permeabilidade do betão aos cloretos, de uma forma indirecta, segundo o descrito na norma ASTM C1202-97 (1997), de acordo com o apresentado na Tabela 3.13, e conhecido na comunidade técnica ou científica como ensaio de Coulumb.

No ensaio de determinação do coeficiente de difusão de cloretos, os provetes são submetidos a diferentes condições de ensaio, tensão aplicada e duração do ensaio (ver Tabela 4.12). O sistema de ensaio possibilita monitorizar a tensão aplicada em cada instante, a variação da intensidade de corrente e a temperatura da solução anódica.

Assim, e como informação adicional, determinou-se a carga passada, de modo a poder estimar a resistência à permeabilidade do betão aos cloretos. Os Coulombs passados durante a duração do ensaio, 24 horas, e para a tensão aplicada, foram normalizados para as condições de ensaio de Coulombs, para uma tensão aplicada de 60 V e duração do ensaio de 6 horas. Os resultados da carga de Coulombs, obtidos ao longo do tempo encontram-se apresentados na Tabela 4.15. De salientar que, e como a duração do ensaio e a tensão aplicada são diferentes do descrito na ASTM C1202-97 (1997), os resultados obtidos poderiam ser eventualmente diferentes dos apresentados na tabela seguinte, caso o ensaio fosse conduzido de acordo com o documento normativo (ASTM C1202-97 (1997)).

Tabela 4.15 – Resistência à permeabilidade do betão aos iões de cloreto

	Condições de cura			
	A. 30° C, Saturado	B. 20° C, 50 % HR	C. 20 °C, Saturado	D. 5 °C, Saturado
Idade, t (dias)	Carga passada (Coulombs, δ (%))			
8	2344.33 (3.58)	2530.20 (2.61)	2874.77 (4.00)	3570.92 (8.96)
29	2242.01 (6.68)	2254.26 (1.70)	2529.90 (3.26)	3339.86 (5.26)
91	2258.93 (6.32)	2235.80 (4.43)	2640.91 (3.81)	-

Da análise de resultados apresentados na Tabela 4.15, mostram que o betão estudado oferece uma resistência média à penetração de cloretos, com base na norma ASTM C1202-97 (1997). Observa-se que para as condições de cura a 5 °C e ambiente saturado, a resistência à penetração é um pouco mais elevado comparativamente com as outras condições de cura. Esta diferença pode ser justificado por ser um betão mais jovem, aplicando a lei de idade equivalente (Tabela 4.10), estamos a ensaiar um betão à idade de 3.82 e 13.86 dias, ou seja, com maturidades diferentes.

De salientar que, a resistência de penetração média, pertence ao intervalo entre [2000, 4000] Coulombs, que é um valor típico para betões correntes com uma razão água/ligante compreendida entre 0.4 e 0.5.

4.7 Previsão da resistência mecânica com base no ensaio de resistividade eléctrica

4.7.1 Introdução

Um dos objectivos principais deste trabalho é definir uma metodologia de ensaio para controlo de qualidade do betão em laboratório com base num ensaio não destrutivo (NDT), o ensaio de resistividade eléctrica.

Nesta secção são apresentadas três metodologias propostas na literatura (Ferreira *et al.*, 2000; Carino *et al.*, 2001; Ferreira *et al.*, 2009), para a previsão das características mecânicas e de durabilidade do betão. Os métodos utilizados são: modelo hiperbólico, linearizado proposto por Carino (2001), para a determinação da resistência mecânica do betão e que posteriormente foi adoptado por Ferreira (2009), para previsão dos valores da resistividade eléctrica do betão; método teórico proposto por Jalali e que é apresentado no trabalho de (Ferreira *et al.*, 2009) e o método de regressão exponencial, desenvolvida por Carino (2001). Foram obtidos valores da resistividade eléctrica do betão em diferentes condições de cura, nomeadamente para ambiente saturado a 30 °C, 20 °C e 5 °C e ambiente com 50 % de humidade relativa.

4.7.2 Metodologia

Os resultados da resistividade eléctrica e da resistência mecânica do betão obtidos a partir dos modelos de previsão são comparados com os valores obtidos

experimentalmente para as idades de 29 e 91 dias de idade, e determinado o erro associado ao método experimental comparativamente com o método aplicado.

Os resultados obtidos por cada uma das leis propostas são apresentados em tabelas, onde são também apresentados os valores dos parâmetros das equações e os desvios encontrados para as diferentes condições de cura do betão.

4.7.2.1 Regressão hiperbólica linearizada

Na metodologia adoptada pretende-se estimar a resistência mecânica aos 29 dias de idade através dos ensaios de resistividade eléctrica e de resistência mecânica obtidos experimentalmente nas primeiras idades (1, 3 e 8 dias de idade), segundo a metodologia proposta por (Ferreira *et al.*, 2009). Devido à curvatura da resistência versus tempo, Carino *et al.*, 2001 sugeriu a aplicação de uma equação hiperbólica para caracterizar a evolução da resistência mecânica. Como a evolução da resistividade eléctrica versus tempo apresenta a mesma tendência da resistência mecânica, pode-se aplicar a mesma metodologia adoptada. A equação [4.6], representa a lei hiperbólica do comportamento da resistividade eléctrica com a idade do betão. Através do método dos mínimos quadrados foi possível determinar os parâmetros da equação, que posteriormente serviu para estimar os valores da resistividade eléctrica a outras idades.

$$y = \frac{x}{ax + b}, y = \rho \quad [4.6]$$

$$x = t \Leftrightarrow \frac{t}{\rho} = at + b$$

em que:

ρ - resistividade eléctrica ($k\Omega.cm$);

t - idade em dias;

$$b = \frac{1}{\rho_{máx.}} \text{ e}$$

a - parâmetro geométrico.

A curva de evolução da resistividade eléctrica apresenta a mesma tendência da curva de resistência mecânica, isto porque à medida que as reacções de hidratação evoluem

a microestrutura fica mais densa e o volume de poros interconectáveis é menor. Na Figura 4.17, apresentam-se os diagramas obtidos por aplicação do método teórico, relatado na equação e para as diferentes condições de cura. A equação ([4.6]) apresentada pode ser utilizada para diagramas com diferentes formatos e tipos de cimento, ou seja, uma vez que as variáveis da equação só dependem de parâmetros geométricos.

Os coeficientes de correlação obtidos são bastante satisfatórios, excepto para as condições de cura de 20 °C, 50 % ($R^2=0.788$), como se ilustra na Figura 4.17 b). À medida que diminui a humidade, diminui a quantidade de água presente nos poros que transportam a corrente, deste modo, observando-se um aumento do valor da resistividade eléctrica.

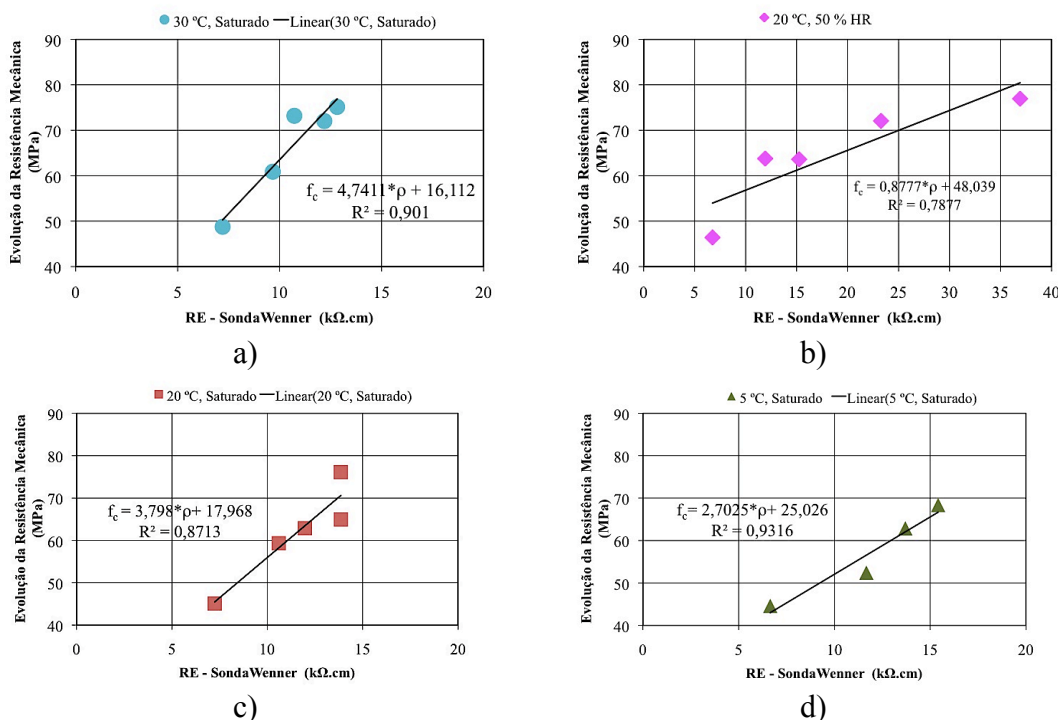


Figura 4.17 – Correlação entre a resistência mecânica à compressão e a resistividade eléctrica com base no método teórico: a) 30 °C, Saturado; b) 20 °C, 50% HR; c) 20 °C, Saturado; d) 5 °C, Saturado.

Figura 4.18 ilustra o melhor ajuste dos resultados obtidos até aos 8 dias de idade usando por base a equação linearizada, obtida a partir dos ensaios de resistividade eléctrica, em formato de tabela, apresenta-se na Tabela 4.16, as variáveis utilizadas para a previsão da resistência mecânica aos 29 dias de idade.

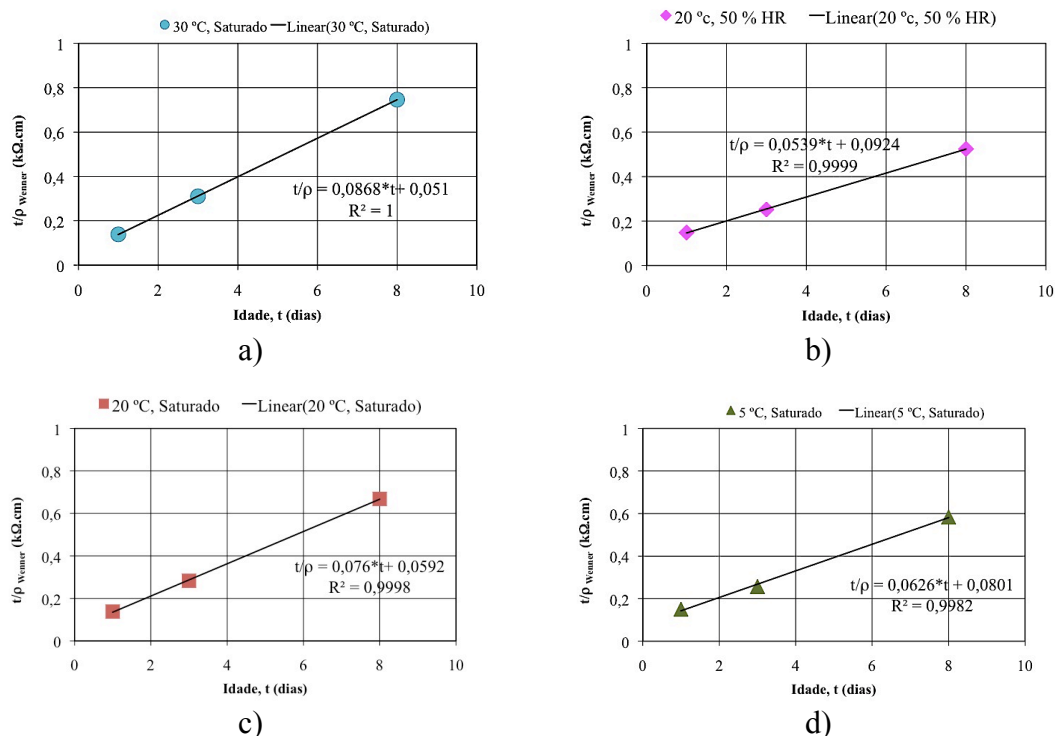


Figura 4.18 – Ajuste da recta às medições de RE obtidas até aos 8 dias de idade:

a) 30 °C, Saturado; b) 20 °C, 50% HR; c) 20 °C, Saturado; d) 5 °C, Saturado.

Tabela 4.16 – Variáveis da equação para previsão da resistência mecânica aos 29 dias de idade com base na RE

Condições de cura	m	b	f_c (MPa), 29 (dias)		Erro (%)
			<i>Exper.</i>	<i>Esti.</i>	
A. 30 °C, Saturado	0.0868	0.051	72.03	69.65	3.41
B. 20 °C, 50 % HR	0.0539	0.0924	72.06	63.41	13.65
C. 20 °C, Saturado	0.076	0.0592	64.93	66.63	2.62
D. 5 °C, Saturado	0.0626	0.0801	73.36	66.37	10.53

Da análise da Tabela 4.16, comparando os resultados experimentais e os obtidos a partir das equações hiperbólicas linearizadas, conclui-se que, o erro observado para as condições de cura em ambiente saturado a 20 °C e 30 °C, são satisfatórios, menores do que 5 %, 2.62 % e 3.41 %, respectivamente.

O modelo apesar de poder aplicar-se a qualquer tipo de diagrama e tipo de cimento, porque está dependente de parâmetros geométricos, parece não ajustar-se bem a temperaturas baixas (5 °C), em que o erro observado foi de 10.53 %. Para a condição

de cura de 20 °C e 50 % de humidade relativa, o modelo também não se ajusta bem, erro observado foi de 13.65 %. Para a presente condição de cura observa-se que ao longo do tempo, microestrutura fica mais densa e uma diminuição da quantidade de água presente nos poros, conduzindo a um aumento de resistividade eléctrica. Da análise da Figura 4.17 b) observa-se um $R^2=0.80$, obtido a partir da correlação entre a resistência mecânica e a resistividade eléctrica, ou seja, a equação linearizada foi influenciada pela perda de humidade ao longo do tempo.

4.7.2.2 Modelo do método teórico

A evolução de qualquer parâmetro de durabilidade ou de resistência mecânica, depende das reacções de hidratação e da evolução da sua microestrutura.

Avarim and Coworkers desenvolveram a equação [4.7], para transformações em estado sólido a temperaturas constantes. Esta equação pretende descrever especificamente a morfologia da cinética de cristalização e pode ser aplicado de um modo geral a outras variações, como por exemplo, as fases de reacção química. O modelo teórico desenvolvido por Jalali e descrito no trabalho de Ferreira (2009), demonstraram que, com a aplicação desta metodologia (equação [4.7]), os mecanismos de formação de matriz cimentícia, traduzem o desenvolvimento da resistência mecânica ao longo do tempo. Os parâmetros de morfologia e de velocidade da formação cimentícia, n , k , foram obtidos recorrendo a um método de regressão não linear.

$$\rho = \rho_{m\acute{a}x.} \times \left(1 - \exp^{-k \times t}\right)^n$$

$$f = f_{m\acute{a}x.} \times \left(1 - \exp^{-k \times t}\right)^n$$
[4.7]

em que:

ρ , f - resistividade eléctrica, resistência mecânica, para a idade t ;

$\rho_{m\acute{a}x.}$, $f_{m\acute{a}x.}$ - resistividade eléctrica máxima, resistência mecânica máxima, para a idade t ;

t - idade em dias;

n - parâmetro que descreve a morfologia do material cimentícios e

k - parâmetro que define a velocidade de forma do material cimentícios.

Na regressão não linear, recorreu-se aos dados obtidos experimentalmente da resistividade eléctrica e da resistência mecânica, avaliados em provetes cúbicos de 150 mm de aresta, até aos 8 dias de idade, de modo a poder estimar a resistividade eléctrica aos 29 dias de idade, por aplicação das expressões apresentadas na equação [4.7], determinou-se a resistividade máxima ($\rho_{máx.}$), o parâmetros de morfologia, n , e k parâmetro que define a velocidade de forma do material cimentício, e obteve-se o $\rho_{estimado}$, e determinou-se o erro observado para a resistividade eléctrica obtida experimentalmente e a obtida através da regressão não linear ($\rho_{estimado}$). A mesma metodologia foi aplicada para os 91 dias de idade, em que se considerou os resultados obtidos experimentalmente até aos 29 dias de idade. Os dados das variáveis encontram-se apresentados na Tabela 4.17, para os 29 e 91 dias de idade.

Tabela 4.17 – Variáveis da equação para previsão da resistividade eléctrica aos 29 e 91 dias de idade

	Condição de Cura e Idade, t(dias)						
	A. 30 °C, Sat.		B. 20 °C, 50 % HR		C. 20 °C, Sat.		D. 5 °C, Sat.
	29	91	29	91	29	91	29
$\rho_{máx.}$	10.816	15.791	15.791	21.366	12.068	13.583	15.414
k	0.488	0.200	0.386	0.200	0.537	02.00	0.588
n	0.426	0.292	0.746	0.758	0.581	0.358	1.037
$\rho_{exp.}$	12.194	12.821	23.278	36.917	13.859	13.854	15.414
$\rho_{estimado}$	10.816	11.930	15.791	21.366	12.068	13.583	15.414
Erro (%)	12.744	7.465	47.411	72.78	14.84	0	0

Os resultados obtidos para previsão da resistividade eléctrica para os 29 e 91 dias de idade (Tabela 4.17) os erros observados são significativos para a condição de cura a 30 °C, saturado, 20 °C e 50 % de humidade relativa. Para as condições de cura de 20 °C, 5 °C em ambiente saturado, o ajuste por aplicação da metodologia parece perfeito.

Para as condições de cura de 20 °C e 50 % HR, o modelo não se ajusta bem, devido à perda de humidade ao longo do tempo, para a presente condição e usando a Sonda Wenner, estamos a medir aproximadamente a distância entre os eléctrodos ($a=50$

mm), uma perda de humidade ao longo do tempo, diminuindo a quantidade de água presente nos poros que conduz a corrente eléctrica, aumentando a resistividade eléctrica, e dado o erro observado, muito elevados, podemos ter medido uma falsa resistividade, embora a matriz cimentícia ainda tenha bastante água para esta humidade relativa, aquela retida nos poros acaba por ter um comportamento não condutor.

A mesma metodologia aplicada à resistência mecânica, determinou-se a resistência máxima, os parâmetros k e n , e a resistência estimada, recorrendo à equação [4.7] e os parâmetros obtidos numericamente encontram-se apresentados na Tabela 4.18, para os 29 e 91 dias de idade.

Tabela 4.18 – Variáveis da equação para previsão da resistência mecânica aos 29 e 91 dias de idade

	Condição de Cura e Idade, t(dias)						
	A. 30 °C, Sat.		B. 20 °C, 50 % HR		C. 20 °C, Sat.		D. 5 °C, Sat.
	29	91	29	91	29	91	29
$f_{m\acute{a}x.}$	77.258	73.155	63.699	72.064	64.093	64.093	68.382
k	0.200	0.304	0.844	0.480	0.594	0.593	0.282
n	0.276	0.311	6.761	0.456	0.436	0.436	0.305
$f_{exp.}$	72.028	75.143	72.064	76.951	64.930	76.122	73.360
$f_{estimado}$	77.193	73.155	63.699	72.064	64.930	64.093	68.376
Erro (%)	-7.17	2.718	-13.292	6.781	1.31	18.768	7.29

Da análise do método aplicado, observam-se resultados muito satisfatórios, para as condições de cura a 20 °C < 5 %, um erro observado de 1.31 %, são também aceitáveis os resultados para a condição de cura a 30 °C e 5 °C em ambiente saturado < 10 %. Em ambiente a 50 % de humidade relativa e a 20 °C, observa-se um erro superior a 10 %, portanto não aceitável. Para os 91 dias de idade, os erros são aceitáveis para as condições de cura a 30 °C em ambiente saturado e a 20 °C e 50 % HR. Relativamente à condição de cura de referência (20 °C, saturado), o erro é considerado elevado.

4.7.2.3 Regressão exponencial

A evolução da resistividade eléctrica ao longo do tempo apresenta a mesma tendência da resistência mecânica. Assim, com base na equação exponencial [4.8], desenvolvida e apresentada por Carino (2001), pretende-se modelar o desenvolvimento da resistência mecânica.

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_{máx.} \times \left(-\left(\frac{\tau}{t}\right)^\alpha \right) \\ f &= f_{máx.} \times \left(-\left(\frac{\tau}{t}\right)^\alpha \right)\end{aligned}\tag{4.8}$$

em que:

t - idade (dias);

τ - velocidade do tempo (constante);

α - parâmetro de forma;

ρ, f - resistividade eléctrica e a resistência mecânica;

A equação pode modelar o desenvolvimento gradual da resistividade eléctrica durante o período de hidratação do cimento e também a assíptota para o valor limite. O τ representa a constante do tempo em que a resistência mecânica e a resistividade eléctrica atingiram $0.37 \times f_{máx.}$, $0.37 \times \rho_{máx.}$, respectivamente. Assim, $1/\tau$ é a constante da equação. O parâmetro de forma (α) afecta a inclinação da recta durante a fase de hidratação e afecta a taxa com que a resistividade eléctrica e a resistência mecânica se aproximam do valor limite. Nas Tabelas Tabela 4.19 e Tabela 4.20, apresentam-se as variáveis da equação para previsão da resistividade eléctrica e resistência mecânica, respectivamente, aos 29 e 91 dias de idade. O objectivo de estimar a resistividade eléctrica e a resistência mecânica, aos 29 e 91 dias de idade, e comparar com base nos resultados obtidos experimentalmente foi avaliar a fiabilidade do método para uma idade de referência, geralmente os 28 dias de idade, e uma idade futura. A previsão para os 29 dias de idade, foram usados os resultados experimentais obtidos aos 1, 3 e 8 dias de idade. Relativamente à estimativa para os 91 dias de idade, foram utilizados os resultados experimentais até aos 29 dias de idade.

Tabela 4.19 – Variáveis da equação para previsão da resistividade eléctrica aos 29 e 91 dias de idade

	Condição de Cura e Idade, t(dias)						
	A. 30 °C, Sat.		B. 20 °C, 50 % HR		C. 20 °C, Sat.		D. 5 °C, Sat.
	29	91	29	91	29	91	29
$\rho_{máx.}$	11.556	13.560	19.685	15.234	12.907	15.234	14.911
k	0.429	0.399	1.104	0.590	0.572	0.590	0.821
n	0.885	0.511	0.689	0.585	0.981	0.585	1.085
$\rho_{exp.}$	12.194	12.281	23.278	36.917	13.859	13.854	15.414
$\rho_{estimado}$	11.283	12.739	17.722	29.812	12.635	14.457	14.601
Erro (%)	8.074	0.644	34.686	23.833	9.687	4.394	5.568

Tabela 4.20 – Variáveis da equação para previsão da resistência mecânica aos 29 e 91 dias de idade

	Condição de Cura e Idade, t(dias)						
	A. 30 °C, Sat.		B. 20 °C, 50 % HR		C. 20 °C, Sat.		D. 5 °C, Sat.
	29	91	29	91	29	91	29
$f_{máx.}$	160.955	75.619	63.690	71.519	64.180	65.109	122.264
k	2.493	0.381	0.876	0.399	0.466	0.439	1.125
n	0.200	0.831	8.654	0.935	1.365	1.218	0.200
$f_{exp.}$	72.028	75.143	72.064	76.951	64.930	76.122	62.883
$f_{estimado}$	87.288	74.823	63.690	71.075	63.952	65.011	62.220
Erro (%)	21.186	0.427	13.148	8.267	1.529	17.091	1.065

A previsão da resistividade eléctrica aos 29 dias de idade, com base nos resultados obtidos experimentalmente nas primeiras idades, 1, 3 e 8 dias de idade, por aplicação do método de regressão exponencial, e determinando o erro observado entre o método e os resultados experimentais, conclui-se que, mais uma vez o erro para a condição de cura 20 °C e 50 % de humidade relativa, pelas razões já mencionadas, assistimos ao longo do tempo a uma perda da quantidade de água presente nos poros, e à

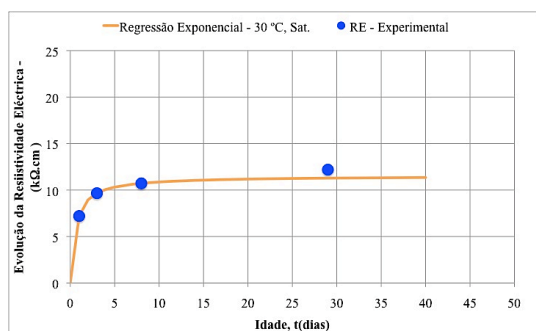
dificuldade de medição da resistividade eléctrica real do betão. As restantes condições de cura, 30 °C, 20 °C e 5 °C em ambiente saturado, de 8 %, 9.7 %, 5.6% respectivamente, são aceitáveis os desvios encontrados ($< 10 \%$).

Relativamente à previsão para os 91 dias de idade, considerando os resultados obtidos experimentalmente aos 1, 3, 8 e 29 dias de idade, o erro observado, é satisfatório para as condições de cura a 30 °C e 20 °C em ambiente saturado. Para a condição de cura a 20 °C e 50 % de humidade relativa, o erro observado continua a ser muito elevado, parece ser um valor atípico.

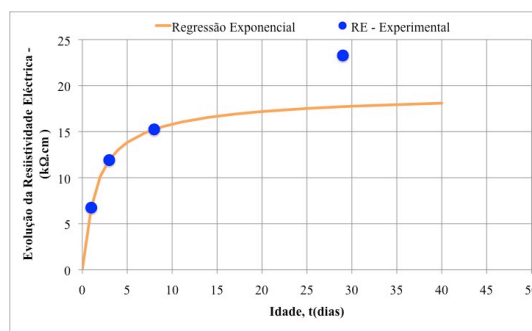
A previsão numérica da resistência mecânica à compressão utilizando o método exponencial, para os 29 dias de idade, considerando os resultados aos 1, 3 e dias de idade, ajustou-se bem aos provetes colocados em ambiente saturado a 20 °C e 5°C. Para as condições de cura a 30 °C, ambiente saturado, e a 20 °C, 50 % de humidade relativa, o ajuste não é satisfatório, maior do que 10 %.

A estimativa da resistência para os 91 dias de idade, parece muito bem, para as condições de cura a 30 °C em ambiente saturado, menor que 5%, aceitáveis para os provetes colocados a 20 °C e 50 % de humidade relativa, menor que 10 %. Para as condições de cura a 20 °C, saturado, o erro observado é elevado.

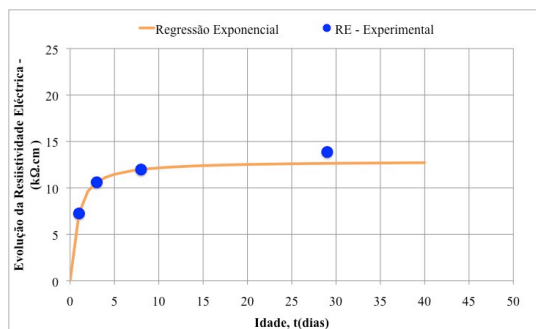
Graficamente e com base nos resultados apresentados nas tabelas, para o método teórico e para o método exponencial, apresentam-se nas Figura 4.19 e Figura 4.20, a evolução da resistividade eléctrica experimental e o modelo numérico para os 29 dias de idade. A previsão numérica e os resultados obtidos experimentais para a resistência mecânica, aos 29 e 91 dias de idade, apresentam-se ilustrados nas Figuras Figura 4.21 e Figura 4.22, respectivamente.



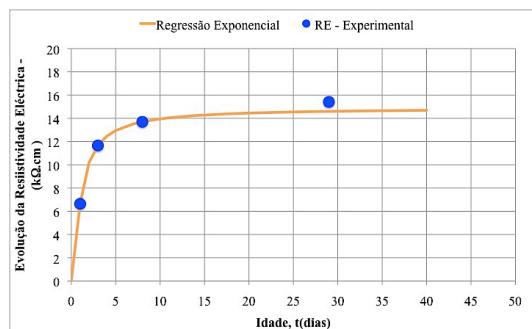
a)



b)



c)



d)

Figura 4.19 – Resultados experimentais e previsão numérica da RE - 29 dias de idade:

a) 30 °C, Saturado; b) 20 °C, 50 % HR; c) 20 °C, Saturado; d) 5 °C, Saturado.

Da análise da Figura 4.19 e da Figura 4.20, pode-se observar que, para previsão da resistividade eléctrica usando os métodos de regressão não linear, e comparando com os resultados obtidos experimentalmente, observa-se uma boa aproximação, à excepção da condição de cura de 20 °C e 50 % de humidade relativa aos 29 e 91 dias de idade, respectivamente.

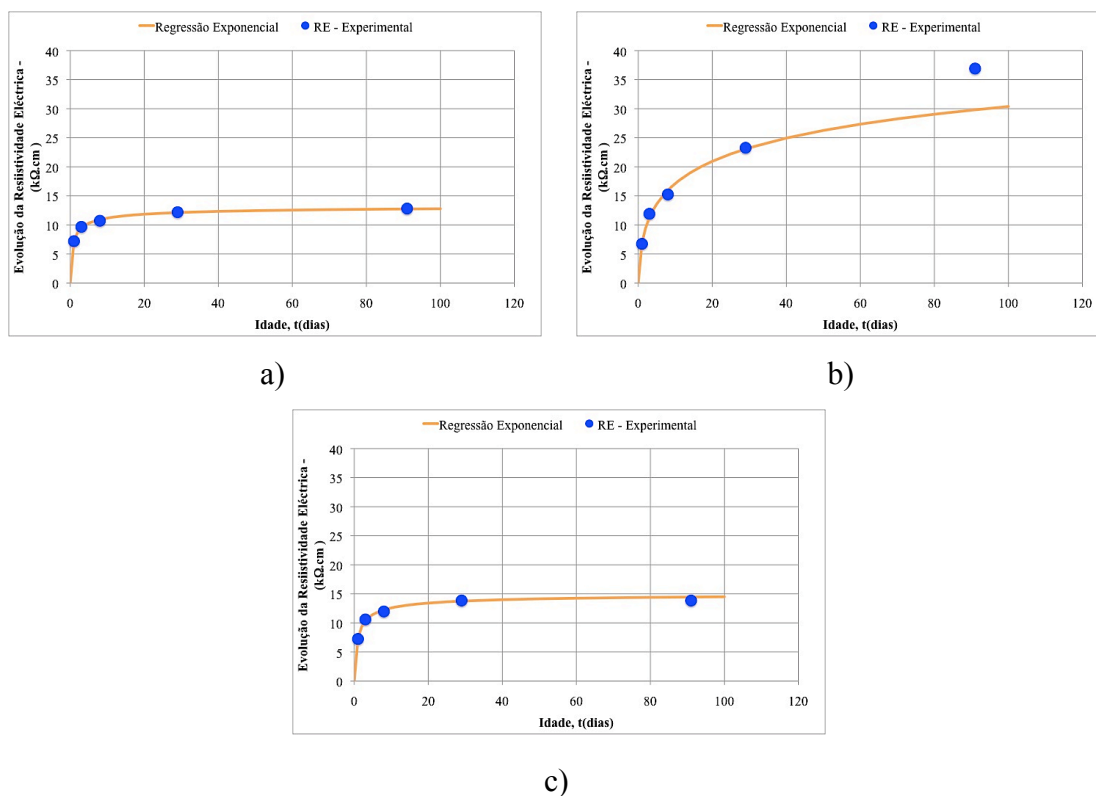


Figura 4.20 – Resultados experimentais e previsão numérica da RE – 91 dias:

a) 30 °C, Saturado; b) 20 °C, 50 % HR; c) 20 °C, Saturado.

A evolução da resistividade eléctrica e da resistência à compressão são dependentes da hidratação contínua do cimento, observando-se a mesma tendência de evolução na estrutura nos poros e na microestrutura. Assim, apresenta-se nas figuras seguintes (Figura 4.21 e Figura 4.22) a previsão da evolução da resistência mecânica obtida experimentalmente com os resultados obtidos recorrendo aos métodos de regressão não linear, para os 29 e 91 dias de idade, respectivamente.

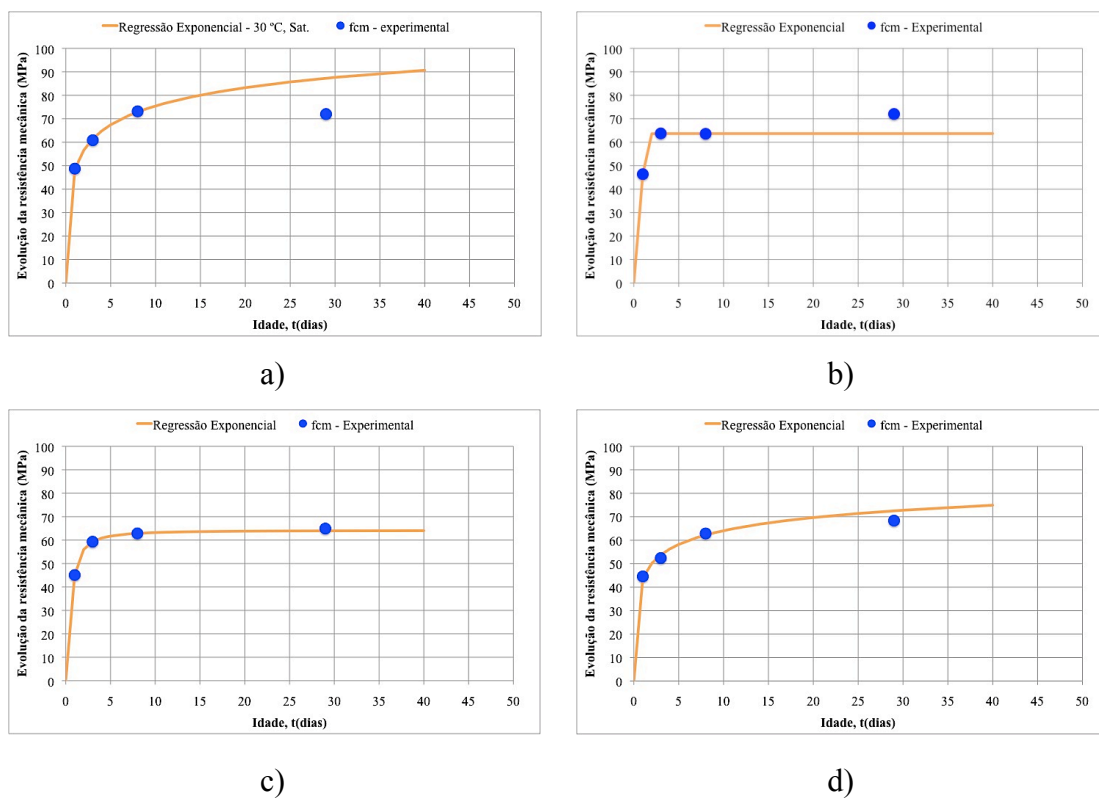


Figura 4.21 – Resultados numéricos e experimentais aos 29 dias de idade.

a) 30 °C, Saturado; b) 20 °C, 50 % HR; c) 20 °C, Saturado; d) 5 °C, Saturado.

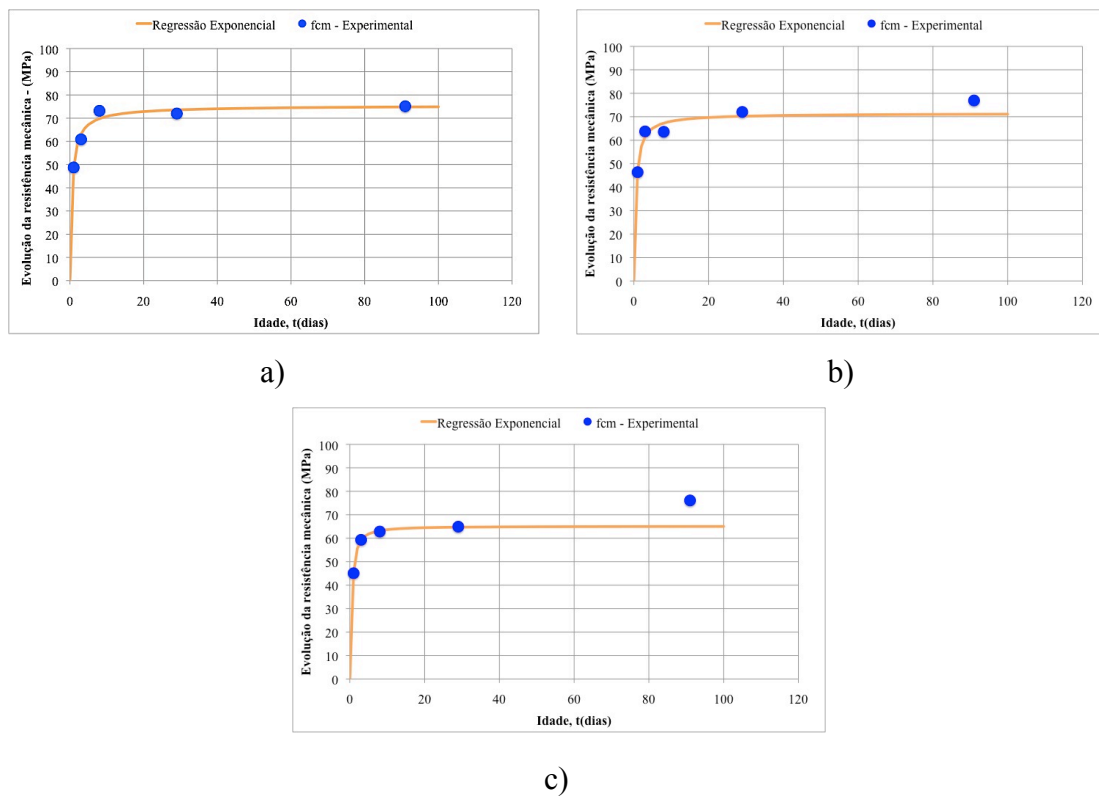


Figura 4.22 – Resultados numéricos e experimentais - 91 dias de idade:

a) 30 °C, Saturado; b) 20 °C, 50 % HR; c) 20 °C, Saturado.

Da análise dos diagramas (ver Figura 4.21 e Figura 4.22), para previsão da resistência mecânica aos 29 e 91 dias de idade, os resultados parecem promissores para estimar a resistência mecânica ao longo do tempo.

Dos métodos apresentados nesta secção, método de regressão hiperbólica linearizada, método teórico e método de regressão exponencial, observa-se uma limitação no primeiro método, se pretendemos estimar a resistividade eléctrica e a resistência mecânica a idades superiores a 29 dias de idade. Relativamente aos métodos de regressão não linear, modelo teórico e exponencial, em ambos os métodos observa-se uma diminuição do erro dos 29 para os 91 dias de idade, salvo raras excepções, no método teórico, a resistividade eléctrica para a condição de cura a 20 °C e 50 % HR, e para a resistência mecânica para a cura a 20 °C e ambiente saturado. Para o método de regressão exponencial, observa-se um aumento do erro dos 29 para os 91 dias de idade, no parâmetro da resistência e para a condição de cura a 20 °C e ambiente saturado.

Para validação dos resultados obtidos, teria sido interessante um maior número de amostras até aos 14 dias de idade, para validar todos os métodos com uma maior grau de confiança. Seria interessante aplicar esta metodologia a outro tipo de betões, com diferentes tipos de cimentos e diferentes razões água/ligante.

Ambos os métodos de regressão não linear, parecem indicar uma excelente ferramenta para o controlo de qualidade do betão das estruturas, a partir dos resultados obtidos experimentalmente nas primeiras idades.

4.8 Análise de correlação

Os ensaios apresentados no presente trabalho, avaliam parâmetros de resistência e de durabilidade. Assim, e para as diferentes condições de cura estudadas, apresenta-se nas tabelas seguintes, a correlação obtida nos diferentes ensaios. Nesta análise foi também realizada a correlação entre as diferentes técnicas de medição de resistividade eléctrica, a técnica dos dois eléctrodos (CA, CC), a sonda Wenner, e a medição da resistividade eléctrica, nos primeiros instantes do ensaio, obtido no ensaio de migração em regime não estacionário, como apresentando na secção 3.4.5.1. Nas correlações obtidas (R^2), adoptou-se uma regressão de ajuste linear. Na Tabela 4.21 e

na Tabela 4.22, apresenta-se o melhor ajuste para as condições de cura em ambiente saturado a 30 °C e a 20 °C e 50 % de humidade relativa, respectivamente. Em ambiente saturado a 20 °C e 5 °C, encontram-se apresentadas nas Tabelas 4.23 e 4.24, respectivamente.

Tabela 4.21 – Coeficientes de Correlação (R^2) – 30 °C, Saturado

R^2	R_C	ρ_{Wenner}	ρ_{CA}	ρ_{CC}	ρ_{CTH}	D_{cl}
	Cubos					
R_C	-	0.901	0.903	0.900	a)	
ρ_{Wenner}	0.901	-	0.994	0.991	0.996	
ρ_{CA}	0.903	0.996	-	0.995	0.999	a)
ρ_{CC}	0.900	0.999	0.995	-	1.000	
ρ_{CTH}	a)	0.996	0.999	1.000	-	
D_{cl}			a)			-

a) no ensaio de difusão, não se observaram boas correlações com os restantes ensaio, tendo sido excluídos da análise.

Tabela 4.22 – Coeficientes de Correlação (R^2) – 20 °C, 50 % HR

R^2	R_C	ρ_{Wenner}	ρ_{CA}	ρ_{CC}	ρ_{CTH}	D_{cl}
	Cubos					
R_C	-	0.788	0.800	0.789	0.998	0.975
ρ_{Wenner}	0.788	-	0.995	0.998	0.934	0.802
ρ_{CA}	0.800	0.995	-	0.999	0.907	0.844
ρ_{CC}	0.789	0.998	0.999	-	0.879	0.876
ρ_{CTH}	0.998	0.934	0.907		-	0.977
D_{cl}	0.975	0.802	0.844	0.876	0.977	-

Tabela 4.23 – Coeficientes de Correlação (R^2) – 20 °C, Saturado

R^2	R_C	ρ_{Wenner}	ρ_{CA}	ρ_{CC}	ρ_{CTH}	D_{cl}
Cubos						
R_C	-	0.871	0.959	0.960	0.778	0.894
ρ_{Wenner}	0.871	-	0.935	0.929	0.839	0.706
ρ_{CA}	0.959	0.935	-	1.000	0.994	0.993
ρ_{CC}	0.960	0.929	1.000	-	0.991	0.996
ρ_{CTH}	0.778	0.839	0.994	0.991	-	0.975
D	0.894	0.706	0.993	0.996	0.975	-

Tabela 4.24 – Coeficientes de Correlação (R^2) – 5 °C, Saturado

R^2	R_C	ρ_{Wenner}	ρ_{CA}	ρ_{CC}	ρ_{CTH}	D_{cl}
Cubos						
R_C	-	0.932	0.954	0.952		
ρ_{Wenner}	0.932	-	0.997	0.998		
ρ_{CA}	0.954	0.997	-	1.000	b)	b)
ρ_{CC}	0.952	0.998	1.000	-		
ρ_{CTH}			b)		-	
D			b)			-

b) condição de cura em que não foi possível encontrar numero de pontos necessários para construção do ajuste linear (apenas dois ensaios).

Da análise das tabelas analisadas (4.21, 4.22, 4.23 e 4.24), observam-se que os coeficientes de correlação (R^2) são geralmente superiores a 0.9, para um ajuste do tipo linear ($y = mx + b$), portanto bastante satisfatórios. A série dos coeficientes de correlação obtidos experimentalmente, vai de encontro aos resultados obtidos e descritos no trabalho de Ferreira (2000).

4.9 Resultados e análise das lajetas de betão

A avaliação da resistividade eléctrica usando a técnica dos 4-eléctrodos, foi realizada aos 3, 7, 21, 38 e 151 dias de idade, acompanhadas das respectivas medições em provetes cúbicos de 150 mm de aresta e provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, para posterior comparação com os resultados experimentais obtidos nas lajetas. As medições da resistividade eléctrica nas lajetas foram sempre realizados no interior da câmara de cura, a uma temperatura de 20 °C e uma humidade relativa $\geq 95 \%$, de modo a garantir que outras condições do meio ambiente não influenciassem a medição da resistividade eléctrica. A calibração do equipamento, como descrito na secção 3.4.3, foi também realizada no interior da câmara de cura, por forma a garantir que as condições do meio ambiente da câmara de cura não influenciavam as medições da resistividade eléctrica, como se ilustra na Figura 4.23. O procedimento de ensaio adoptado nas medições de resistividade eléctrica, usando a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner), na lajeta sem armadura foi o descrito no ponto 3.4.3.1. No caso da lajeta com armadura, o procedimento de ensaio foi conduzido de acordo com o descrito em 3.4.3.2.

As lajetas foram desmoldados ao final de 24 horas após a betonagem, e colocadas no interior da câmara de cura, nas condições acima referidas. O início das medições de resistividade eléctrica for realizado ao final de 48 horas após a betonagem. Ao terceiro dia de idade as amostras foram colocadas num tanque com água, ambiente saturado, a 20 °C.

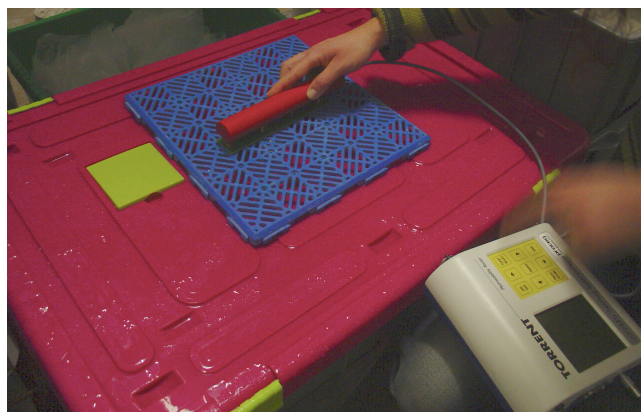


Figura 4.23 – Aferição do equipamento na câmara de condicionamento.

4.9.1 Lajetas sem armadura – Lajeta A

As medições da resistividade eléctrica ao longo do tempo, usando a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner), foram avaliadas na laje sem armadura, como se ilustra na Figura 4.24. As medições da resistividade eléctrica foram realizadas em várias secções, paralelamente à direcção y (360 mm), incluindo zonas da laje de 200 e 150 mm, afastadas do bordo de 10, 20, 50, 150, 180, 190 e 200 mm. Estas secções foram previamente marcadas, e a avaliação da resistividade eléctrica ao longo do tempo foi realizada sistematicamente na mesma posição (Figura 4.25). Desta forma, não só o efeito da distância em relação ao rebordo foi avaliada como também a espessura da lajeta é avaliada com as condições, no tempo.

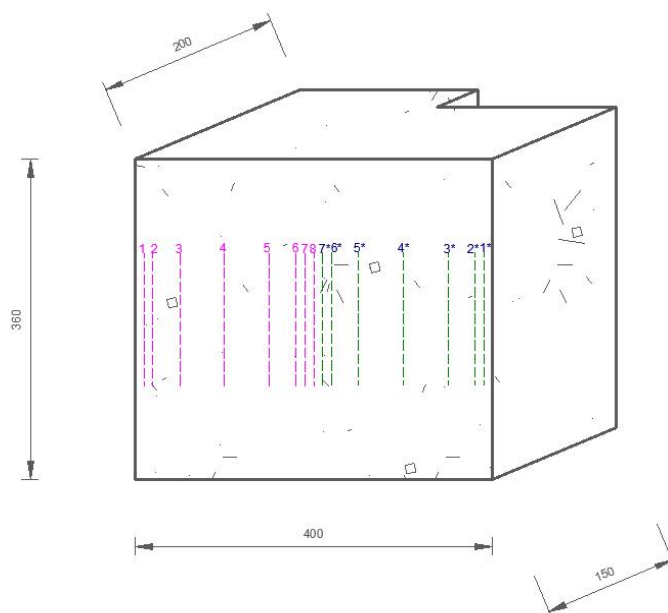


Figura 4.24 – Secções de medição da RE na lajeta sem armadura (lajeta A).

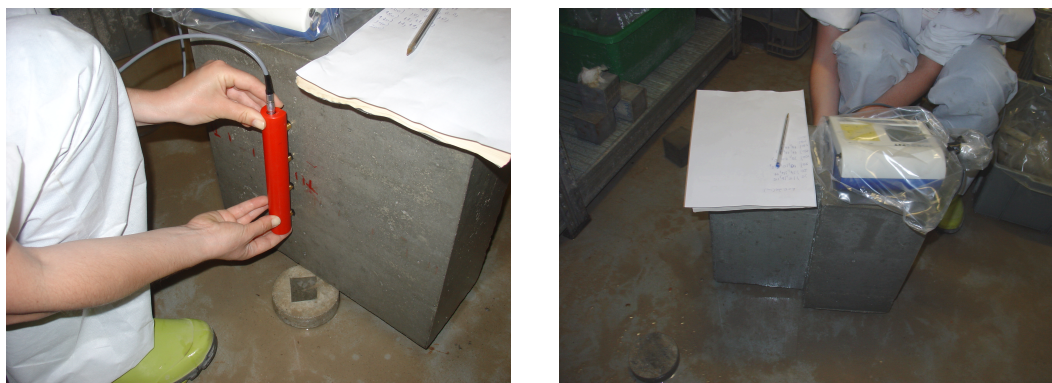


Figura 4.25 – Avaliação da RE na lajeta sem armadura.

4.9.1.1 Influência do bordo

As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam a evolução da resistividade eléctrica, usando a técnica dos 4-electródos, observada ao longo do tempo (2, 3, 7, 21, 38 e 151 dias de idade), na lajeta sem armadura, para as espessuras de betão de 150 mm e 200 mm, respectivamente. De salientar que nos resultados obtidos aos 21 dias de idade observaram-se valores de resistividade eléctrica anómalos. Este facto, pode ser justificado por uma avaria da câmara de cura durante o período de fim de semana. Apesar das lajetas estarem em ambiente saturado a 20 °C, as condições da câmara foram alteradas, temperatura e humidade, mudando deste modo as medições de resistividade eléctrica, optando-se por não se considerar esse resultado na presente análise. Nas Figuras 4.28 e 4.29 apresentam-se a evolução da RE versus a distância ao bordo, avaliada ao longo do tempo, para as diferentes espessuras de betão (150 e 200 mm).

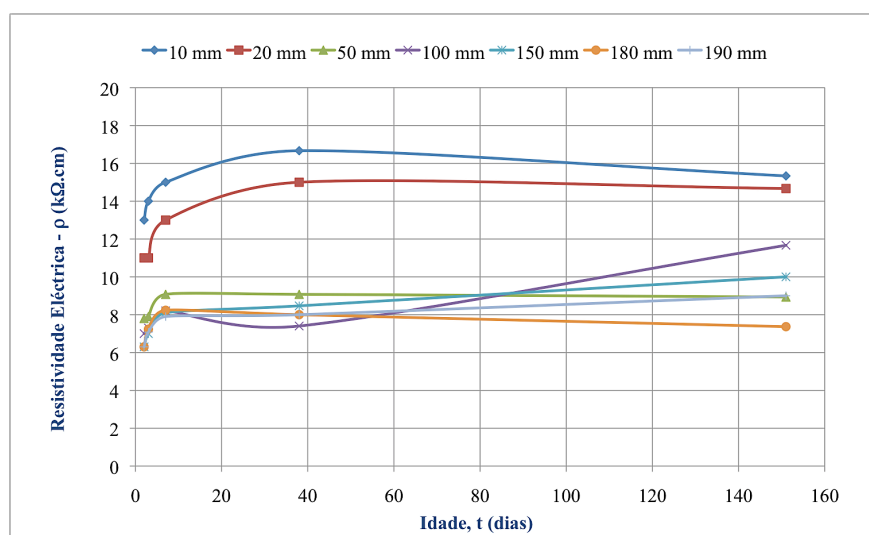


Figura 4.26 – Evolução da resistividade eléctrica no modelo de laje sem armadura – espessura de laje de 150 mm.

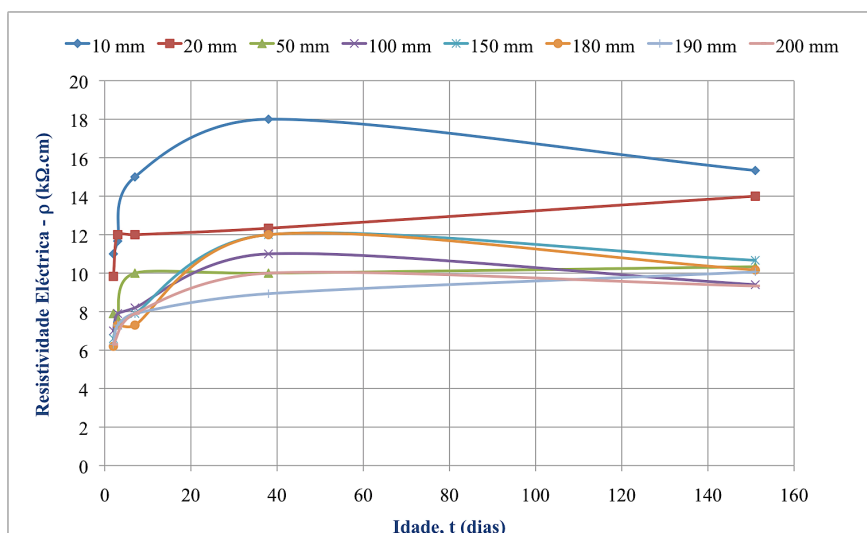


Figura 4.27 – Evolução da resistividade eléctrica no modelo de laje sem armadura – espessura de laje de 200 mm.

Da análise das Figuras (4.26 e 4.27), é possível observar que a resistividade eléctrica, evolui com o tempo, como expectável.

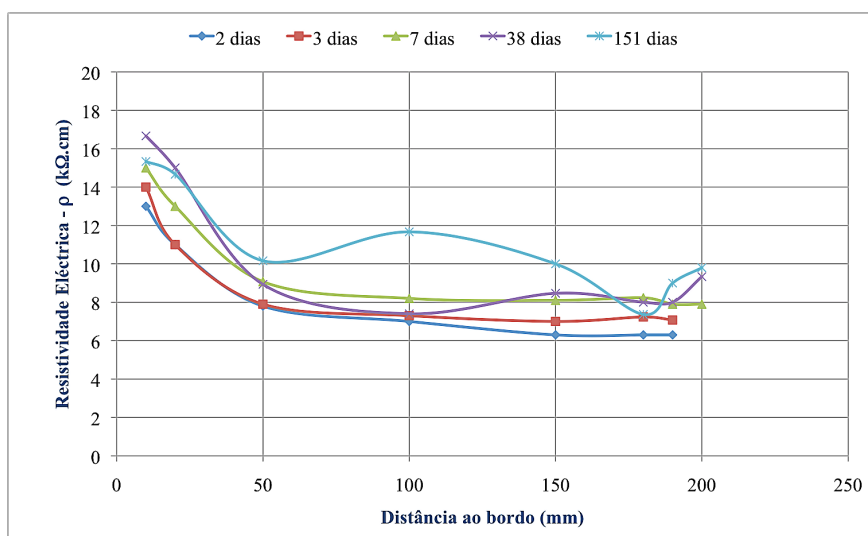


Figura 4.28 – Evolução da resistividade eléctrica no modelo de laje sem armadura – espessura de laje de 150 mm.

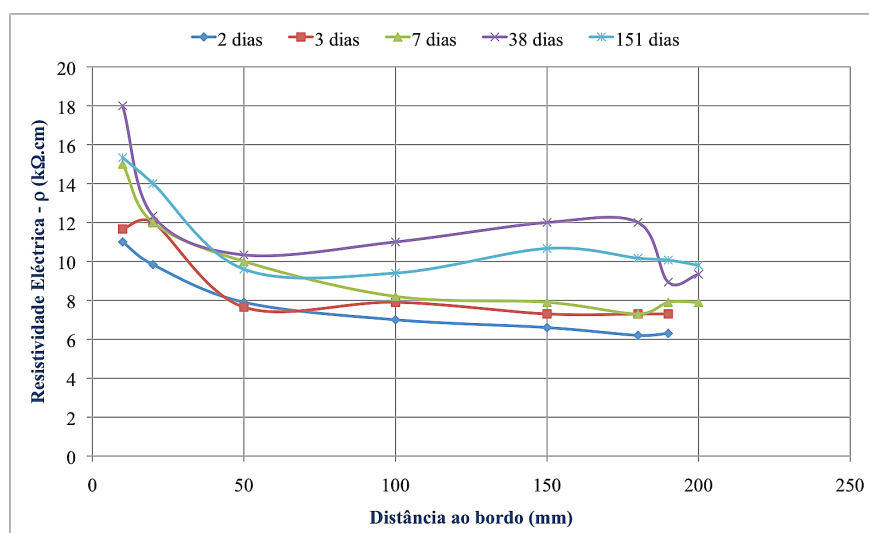


Figura 4.29 – Evolução da resistividade eléctrica no modelo de laje sem armadura – espessura de laje de 200 mm.

Da análise das Figuras 4.28 e 4.29 observa-se que, as medições efectuadas junto ao bordo influenciam significativamente as medições de resistividade eléctrica, usando a técnica dos 4-electródos (Sonda Wenner) e para um espaçamento entre os eléctrodos (a) constante entre si de 50 mm, para as distâncias ao bordo apresentadas de 10, 20, 50, 100, 150 mm e 200 mm. A resistividade eléctrica aumenta à medida que nos aproximamos do bordo da laje, este facto pode ser justificado pela influência da corrente eléctrica num meio homogéneo possuir uma componente tridimensional, sendo mais restrita junto ao bordo o que resulta numa sobreavaliação da resistividade eléctrica.

Dos resultados obtidos na lajeta sem armadura (lajeta A), a partir dos 150 mm medidos a partir do bordo da laje, ou seja, para as medições de resistividade eléctrica efectuadas nas secções localizadas a 180, 190 e 200 mm, a distância ao bordo parece não influenciar as medições de resistividade eléctrica. Assim, para a determinação da variação média da RE ao longo do tempo, adoptou-se os valores médios nas medições de resistividade eléctrica, medidas nas secções localizadas a 180, 190 e 200 mm, e determinou-se o coeficiente de variação observado com as medições médias realizadas aos 10, 20, 50, 100 e 150 mm, para as diferentes espessuras de laje de 150 e 200 mm de espessura, respectivamente, conforme se apresenta resumidamente na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Variação média observada nas medições da RE

Espessura da Laje, e (mm)	Coeficiente de variação - $\delta(\%)$				
	10	20	50	100	150
150	47.90	40.06	12.00	5.09	2.39
200	41.59	31.63	9.31	5.24	5.98

A partir dos resultados apresentados, observa-se que a influência do bordo é muito significativa nas medições de resistividade eléctrica e para as diferentes espessuras da lajeta (150, 200 mm). As medições de resistividade eléctrica aumentam significativamente do meio para o bordo da lajeta. De salientar que, os resultados experimentais obtidos e para as espessuras de laje aqui apresentadas, existe uma tendência para um aumento da resistividade eléctrica junto ao bordo quando a espessura de laje é menor, ou seja, para a espessura de 150 mm.

4.9.1.2 Influência das dimensões dos provetes

A influência das dimensões das amostras tem um papel fundamental nas medições da resistividade eléctrica, utilizando a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner), como se apresenta ilustrado na Figura 4.30.

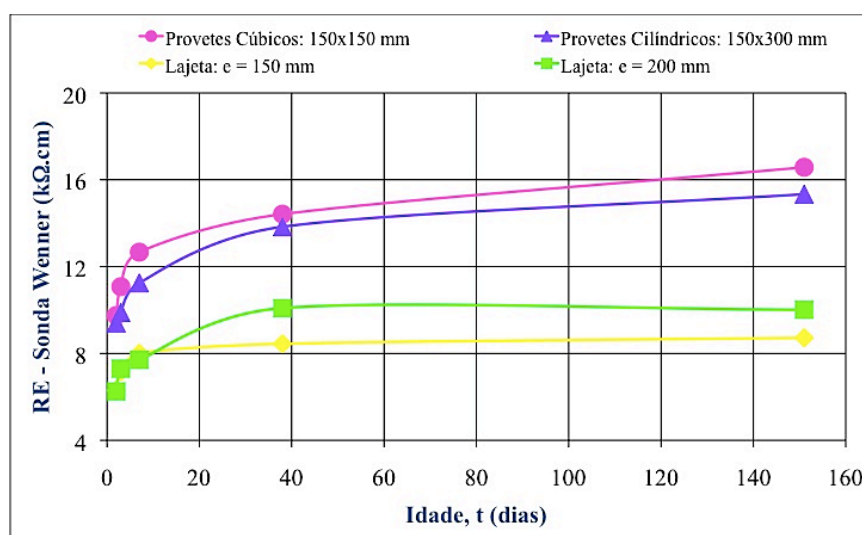


Figura 4.30 – Influência das dimensões das amostras na medição RE – Sonda Wenner.

Da análise da Figura 4.30, e fazendo uma comparação para as diferentes amostras analisadas, provetes cúbicos de 150 mm de aresta, provetes cilíndricos ($\phi 150$ mm \times 300 mm de altura) e lajeta sem armadura (lajeta A), e para diferentes espessuras de betão (150 e 200 mm), conclui-se que as medições de resistividade eléctrica usando a Sonda Wenner (4-eléctrodos), em provetes cúbicos e provetes cilíndricos majora as medições da RE, comparativamente com as medições de RE realizadas na lajeta sem armadura (lajeta A), devido às condições fronteira das amostras com dimensões padrão.

Comparando os resultados obtidos em provetes cúbicos e cilíndricos e para uma espessura de laje de 200 mm de espessura, observa-se que, as medições da RE média é mais alta em provetes com dimensões padrão, aproximadamente 56.14 % (cubos) e 44.45 % (cilindros), respectivamente. A mesma tendência se observa mas agora para a espessura de laje de 150 mm, a resistividade eléctrica é mais elevada cerca de 57.83 % em provetes cúbicos e de 47.91 % em provetes cilíndricos. Para a espessura de laje de 150 mm de espessura não foi considerado a medição realizada aos 151 dias de idade.

Analizando agora as diferentes técnicas de medição de resistividade eléctrica em provetes cúbicos, técnica dos 2-electrodos e a técnica dos 4-eléctrodos, avaliada aos 3, 7, 21, 38 e 151 dias de idade, observa-se que a RE usando a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner) é superior comparativamente com a técnica dos 2-eléctrodos, aproximadamente 62 % e 65.5 % (CA/CC) obtida em provetes cúbicos e em provetes cilíndricos, respectivamente. Os resultados vão de encontro aos resultados obtidos experimentalmente e apresentados na secção 4.3.1, um pouco mais elevado no caso dos provetes betonados aquando as lajetas. Estes resultados parecem indicar que, usando a técnica dos 2-eléctrodos, e neste caso de estudo, usando os eléctrodos colocados exteriormente, chapas de aço inox de 2 mm de espessura que, os resultados se aproximam da medição de RE em lajetas com dimensões semi-infinitas. Na Figura 4.31 apresenta-se a correlação entre a duas técnicas de ensaio, 2-eléctrodos (CA/CC) e a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner) observada em provetes cúbicos de 150 mm de aresta.

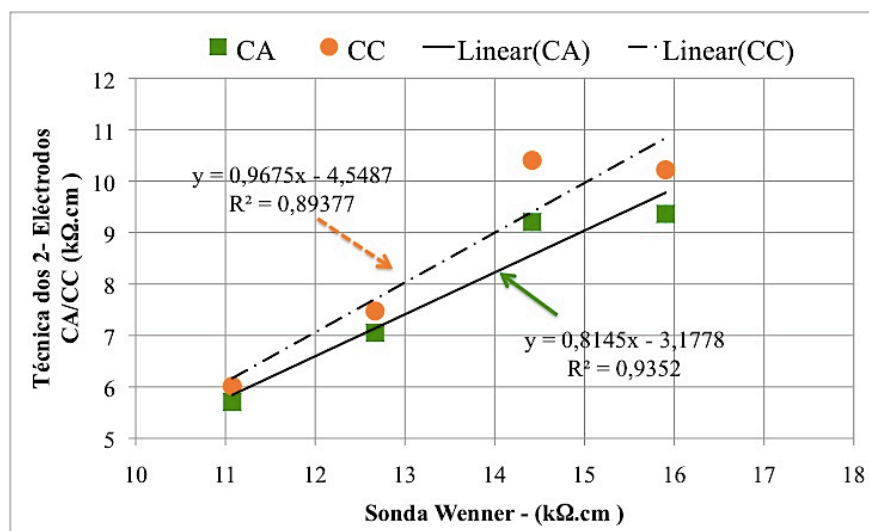


Figura 4.31 – Correlação entre a técnica dos 2-electrodos e a técnica dos 4-electrodos (Sonda Wenner) – provetes cúbicos.

4.9.2 Lajeta com armadura – Lajeta B

No modelo de laje com armadura, o objectivo principal do estudo foi avaliar a influência das armaduras nas medições de resistividade eléctrica, utilizando a técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner). Adoptou-se a Sonda Wenner na medição da RE, por ser a técnica mais simples para medição da resistividade eléctrica em elementos de betão armado in-situ.

De acordo com a representação esquemática apresentada na Figura 3.33, para além das medições efectuadas próximas dos varões de aço, foi possível também avaliar a influência de diferentes espessura de recobrimento. Na Figura 4.32, apresenta-se a espessura de recobrimento analisada, de 35 mm, segundo a direcção paralela ao eixo dos YY. Na Figura 4.33 apresenta-se a espessura de recobrimento de 165 mm, realizada na mesma direcção (paralela ao eixo dos YY).

4.9.2.1 Medições realizadas na direcção paralela ao eixo YY

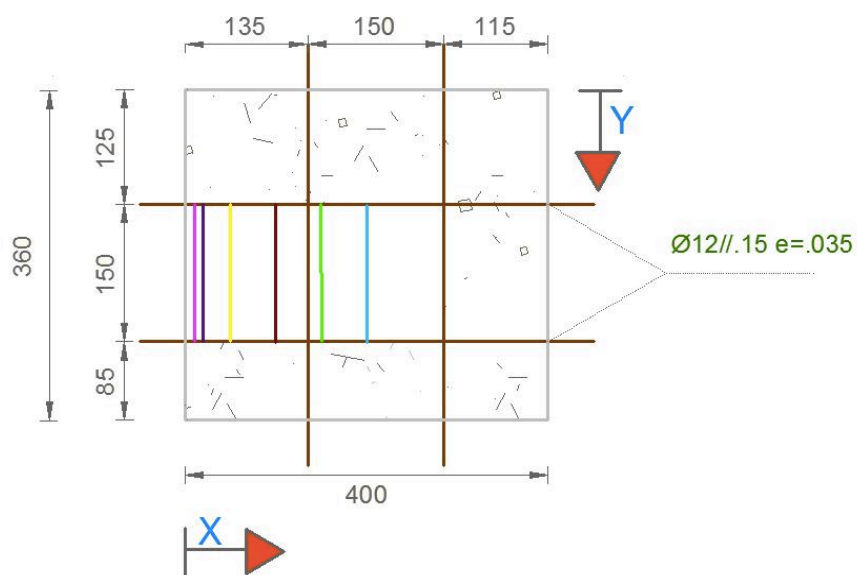


Figura 4.32 – Representação esquemática da espessura de recobrimento (direcção paralela ao eixo YY).

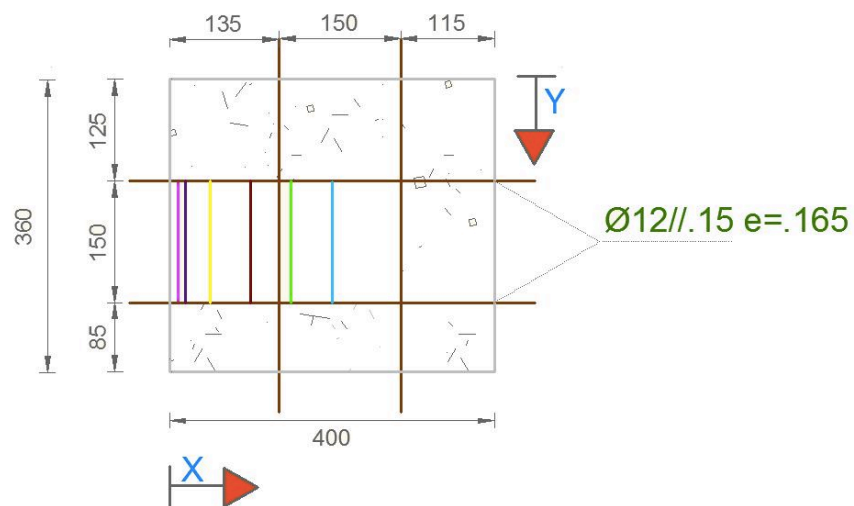


Figura 4.33 – Representação esquemática da espessura de recobrimento (e = 165 mm).

As medições de resistividade eléctrica, realizadas na direcção paralela ao eixo dos YY, menor dimensão da laje (360 mm), foram realizadas a uma distância do bordo de 10, 20, 50, 100, 150 e 200 mm, como se apresenta esquematizado nas Figuras 4.32 e 4.33. Nas Figuras 4.34 e 4.35, apresenta-se a evolução da resistividade eléctrica com o tempo, observadas para as espessuras de recobrimento de 35 e 165 mm, respectivamente.

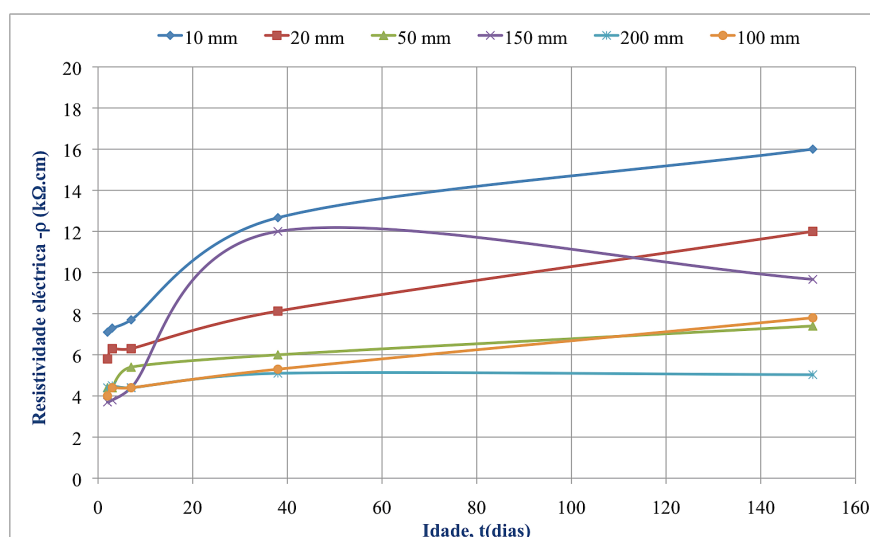


Figura 4.34 – Avaliação da RE ao longo do tempo – direcção YY, e = 35 mm.

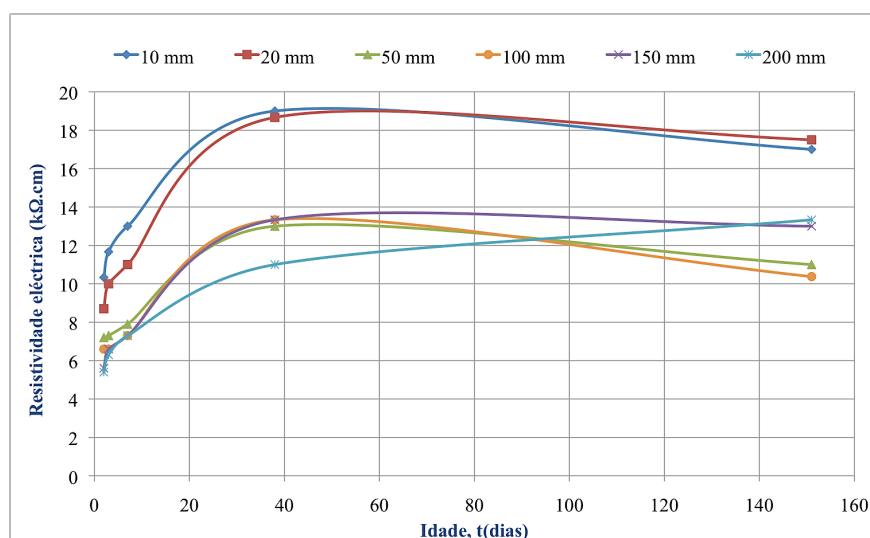


Figura 4.35 – Avaliação da RE ao longo do tempo – direcção YY, e = 165 mm.

Da análise das Figuras 4.34 e 4.35, a resistividade eléctrica evolui com o tempo, como expectável, salvo raras excepções, que podem, eventualmente, estar associadas a um erro de medição. Também é possível observar que a espessura de recobrimento

influência a medição de resistividade eléctrica. Para a espessura de laje de 165 mm de recobrimento, a resistividade eléctrica é maior comparativamente com a face com recobrimento de 35mm. A influência das medições da resistividade eléctrica na face de maior recobrimento (165 mm), parecem não ser influenciados pela presença de armadura, aproximando-se das medições obtidas na lajeta sem armadura (ver Figura 4.27). Nas Figuras seguintes (4.38 e 4.39) é possível observar a influência do bordo e a influência da armadura na medição da resistividade eléctrica, no tempo.

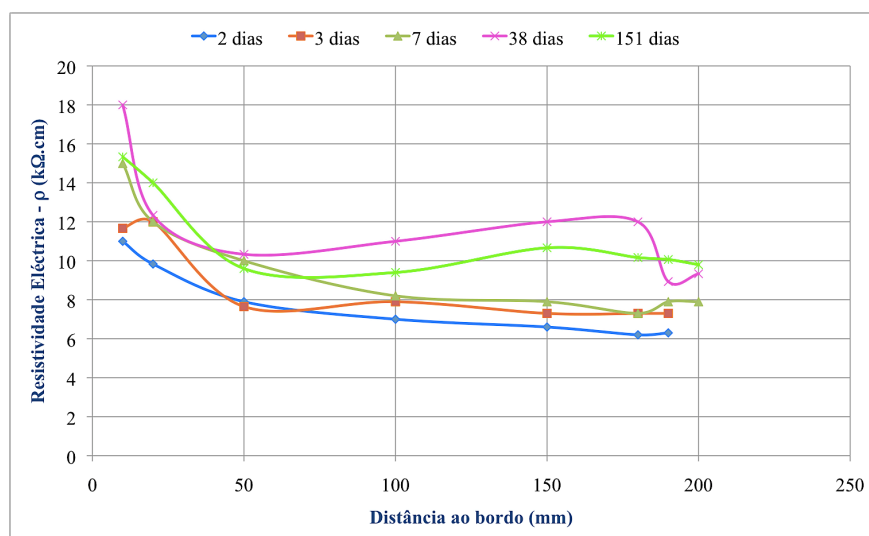


Figura 4.36 – RE versus distância ao bordo – direcção YY, e = 35 mm.

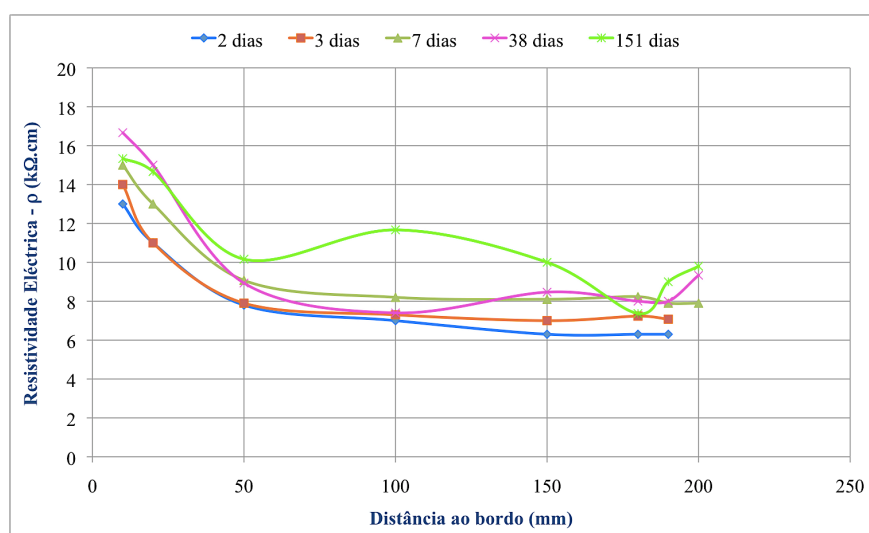


Figura 4.37 –RE versus distância ao bordo – direcção YY, e = 165 mm.

Na Sonda Wenner (4-eléctrodos), utilizada para as medições de resistividade eléctrica na lajeta de betão, a corrente eléctrica é aplicada nos 2-eléctrodos mais exteriores, e a medição da diferença de potencial é medida pelos 2-eléctrodos mais interiores, ou seja, os dois eléctrodos exteriores estão posicionados sobre a armadura, e os dois eléctrodos mais interiores (que medem o diferencial de potencial), estão posicionados sobre o betão.

Neste estudo, além da presença da armadura, temos a influência do bordo nas medições, e comparando os resultados obtidos no modelo de laje sem armadura, observa-se que a medição sobre a armadura faz baixar consideravelmente o valor da resistividade eléctrica, principalmente nas primeiras idades.

Comparando as medições realizadas aos 100 mm, parece que o efeito do bordo é menor, no caso da medição efectuada aos 150 mm. Os resultados parecem indicar que, a medição da RE diminui, também pela influência do elemento de aço colocado na vertical, próximo da medição efectuada.

A profundidade de medição da resistividade eléctrica usando a Sonda Wenner, é aproximadamente 50 mm, ou seja, igual ao espaçamento entre os eléctrodos, e constante entre si.

Observa-se pela análise dos resultados diferenças significativas, comparando as espessuras de recobrimento de 35 mm e 165 mm. Analisando as diferenças observadas aos 7 dias de idade, observa-se que a resistividade eléctrica é mais elevada na espessura de laje com uma espessura de recobrimento de 165 mm, aproximadamente 58 % comparativamente com as medições realizadas na espessura de recobrimento de 35 mm. Aos 151 dias de idade, observou-se a mesma tendência, mas com uma diferença menor. A resistividade eléctrica foi mais elevada na espessura de 165 mm de recobrimento (comparativamente com a espessura de recobrimento de 35 mm) aproximadamente 35 %. Nesta análise foram excluídas as medições efectuadas aos 200 mm distanciados do bordo.

Comparando a lajeta sem armadura aos 7 dias de idade e para as diferentes espessuras de betão estudadas (200 e 150 mm), com a lajeta com armadura, com a orientação das leituras realizadas na direcção paralela ao eixo dos YY, observa-se que, a presença de

armadura, influencia os resultados de medição da resistividade eléctrica. A resistividade eléctrica é mais elevada na lajeta sem armadura (lajeta A), comparativamente com a lajeta com armadura (lajeta B), para uma espessura de recobrimento de 35 mm, 49.4 % e de 49.5 %, para as espessuras de betão de 200 e 150 mm, respectivamente. Para a espessura de recobrimento de 165 mm observa-se a mesma tendência, mais elevado na lajeta sem armadura (lajeta A), cerca de 25.8 % e de 25.88 %, para as espessuras de betão de 200 e 150 mm, respectivamente.

Observando os resultados aos 151 dias de idade, não são notadas as mesmas tendências. A resistividade eléctrica na lajeta sem armadura (lajeta A) continua a ser mais elevada, mas agora com diferenças menores comparativamente com a lajeta com armadura (lajeta B) e para uma espessura de recobrimento de 35 mm. Para a espessura de betão de 200 mm, a RE é mais elevada cerca de 12.5 %, e de 24.6 % para a espessura de betão de 150 mm, comparativamente com a lajeta com armadura (lajeta B).

Analisando os resultados obtidos para a lajeta com uma espessura de recobrimento de 165 mm com a lajeta sem armadura, a resistividade eléctrica foi mais elevada na lajeta com armadura (lajeta B), cerca de 16.1 % e de 11.8 %, para as espessuras de laje de 200 e 150 mm, respectivamente. Os resultados parecem indicar que a partir de uma determinada idade, a microestrutura do betão fica mais densa, e para uma espessura de recobrimento de 165 mm, os resultados de resistividade eléctrica parecem indicar que não são influenciados pela presença de armadura. Nas Figuras 4.38 e 4.39 apresentam-se as medições de resistividade eléctrica efectuada aos 7 e 151 dias de idade, respectivamente, efectuadas na lajeta com e sem armadura e para as diferentes espessuras de recobrimento.

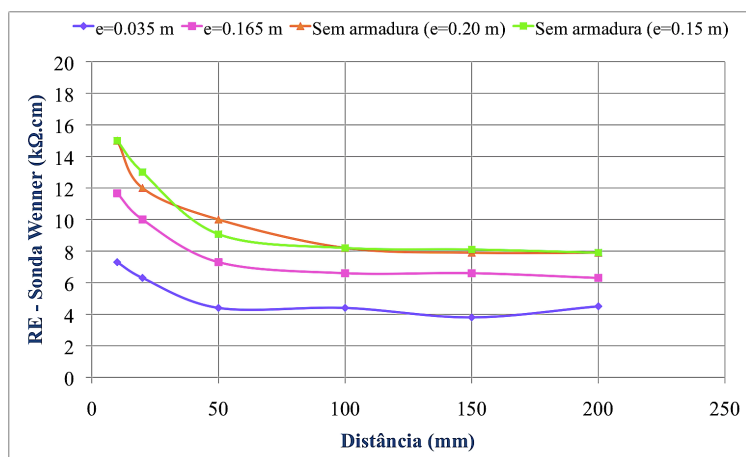


Figura 4.38 – Influência das espessuras de recobrimento comparativamente com o modelos sem armadura na medição da RE aos 7 dias de idade.

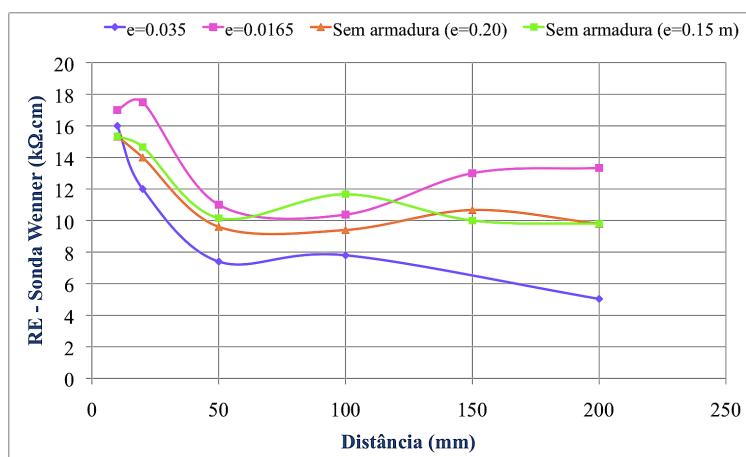


Figura 4.39 – Influência das espessuras de recobrimento (Lajeta B) comparativamente com o lajeta sem armadura (Lajeta A) na medição da RE aos 151 dias de idade.

4.9.2.2 Medições realizadas na direcção paralela ao eixo dos XX

Analisando agora a resistividade eléctrica na direcção paralela a XX, e com uma espessura de recobrimento de 50mm, como se apresenta na Figura 4.40. Na direcção paralela ao eixo dos XX, foram realizadas medições a uma distancia ao bordo de 10, 20, 50, 100, 150, 200, 250, 310 e 350 mm.

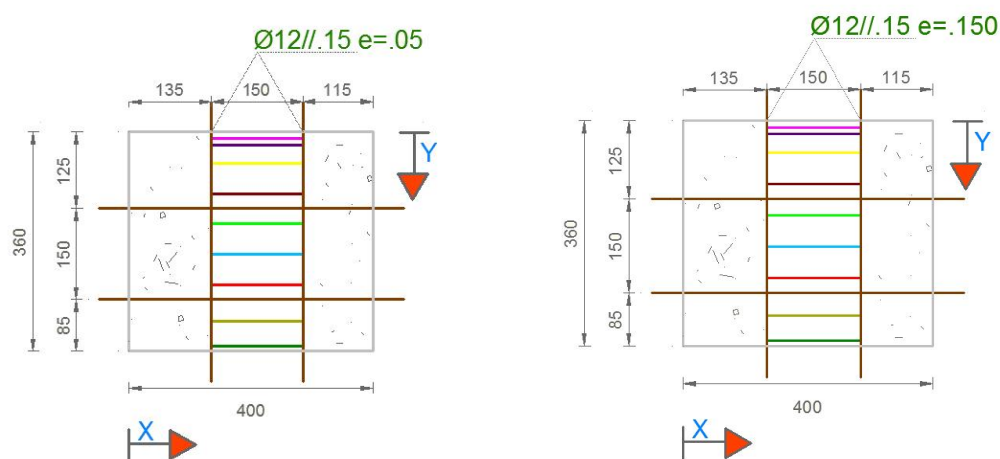


Figura 4.40 – Representação da espessura de recobrimento (paralela ao eixo dos XX).

Nas Figuras 4.41 e 4.42 apresenta-se a evolução da resistividade eléctrica ao longo do tempo, para a espessura de recobrimento de 50 mm e de 150 mm, respectivamente, na direcção paralela ao eixo dos XX.

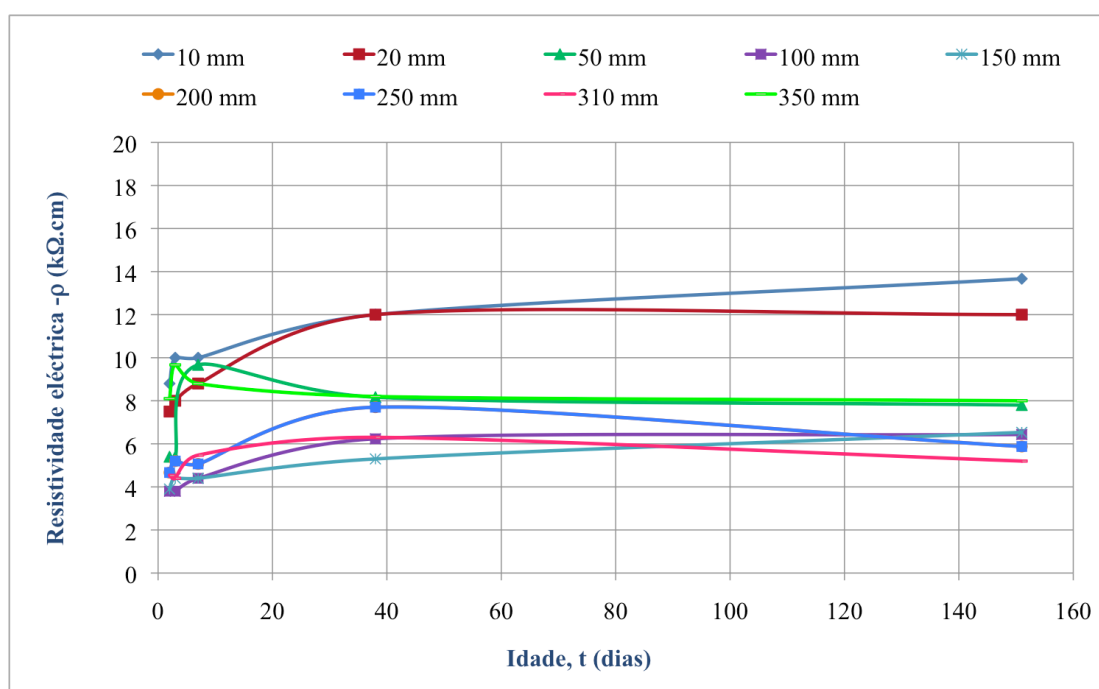


Figura 4.41 – Evolução da RE ao longo do tempo na lajeta B (e = 50 mm).

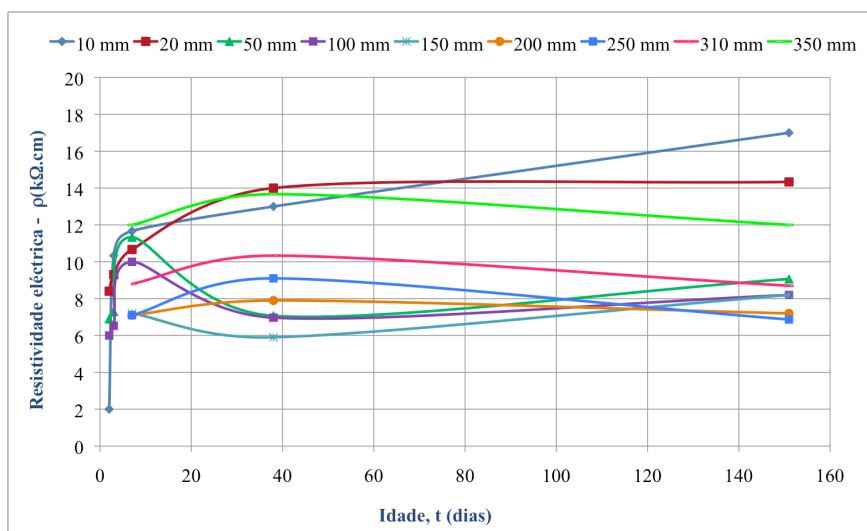


Figura 4.42 - Evolução da RE ao longo do tempo na Lajeta B ($e = 150$ mm).

Da análise dos diagramas acima representados (Figuras 4.41 e 4.42), podemos concluir que, a resistividade eléctrica evolui com o tempo, salvo raras excepções, por exemplo, na medição realizada aos 250 mm de distância ao bordo e para um recobrimento de 150 mm.

Nas figuras 4.43 e 4.44 apresentam-se a resistividade eléctrica versus a distância ao bordo.

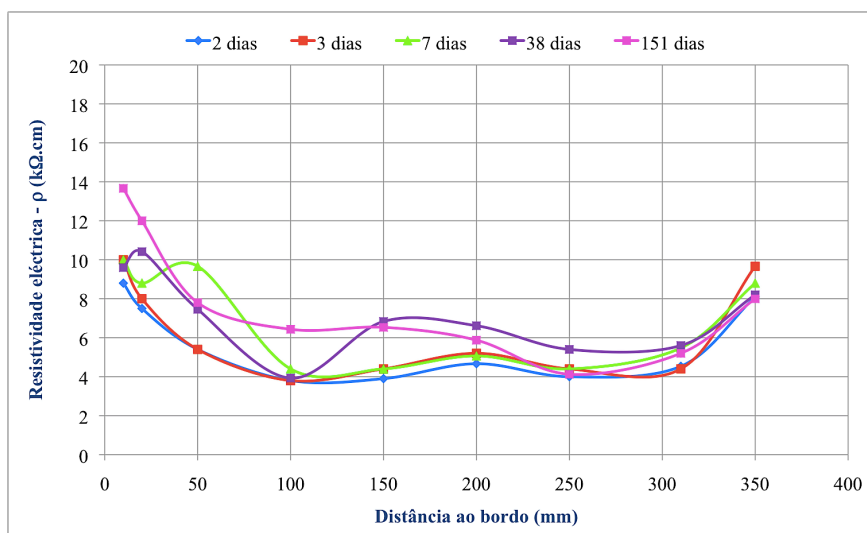


Figura 4.43 – Evolução da RE ao longo do tempo na lajeta B ($e = 50$ mm).

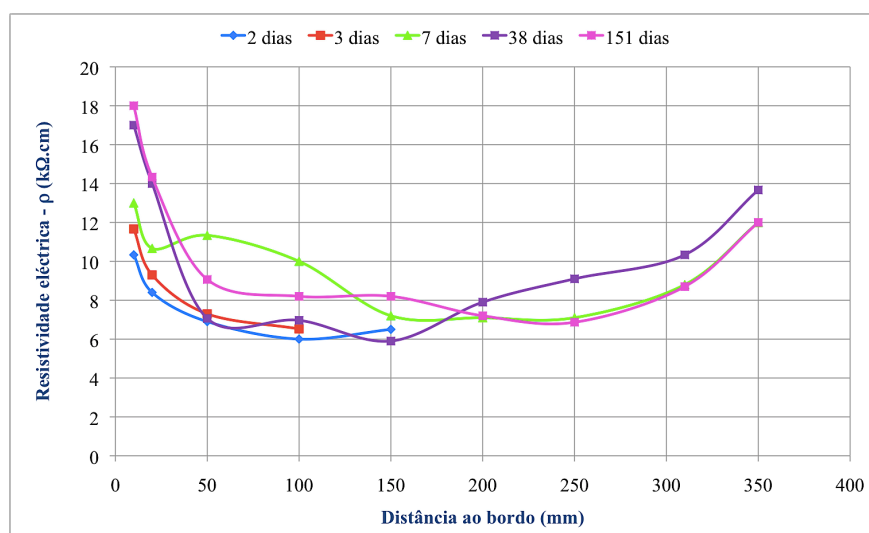


Figura 4.44 - Evolução da RE ao longo do tempo na Lajeta B ($e = 150 \text{ mm}$).

Na medição da resistividade eléctrica em elementos de betão armado, e se pretendemos realizar medições ao longo do tempo, é muito importante que a localização dos eléctrodos seja colocada sempre na mesma posição. No decorrer deste trabalho esse cuidado foi tomado em conta, no entanto, alguns dos resultados obtidos podem estar influenciados por esse facto, nomeadamente a diminuição da RE, pode estar associado ao “incorrecto” posicionamento do eléctrodo relativamente à ultima medição realizada.

Comparando agora os resultados obtidos nas diferentes espessuras de recobrimento, aos 7 dias de idade, e para as diferentes distâncias ao bordo, observou-se que a resistividade eléctrica foi mais elevada na lajeta com um recobrimento de 150 mm, cerca de 41.33 %. Para esta análise foi excluída a medição efectuada aos 100 mm de distância ao bordo. Aos 151 dias de idade, observa-se a mesma tendência, a RE é mais elevada na face com uma espessura de recobrimento de 150 mm, aproximadamente 36.3 %. A idade do betão parece influenciar as diferenças observadas na medição da resistividade eléctrica, nas lajetas com diferentes espessuras de recobrimento, como se ilustra nas Figuras seguintes (4.45 e 4.46).

Nesta análise, não se compararam os resultados obtidos experimentalmente no modelo de laje sem armadura, porque na direcção paralela ao eixo dos XX, não foram efectuadas medições, pelo facto de a lajeta ter um desnível (diferentes espessuras).

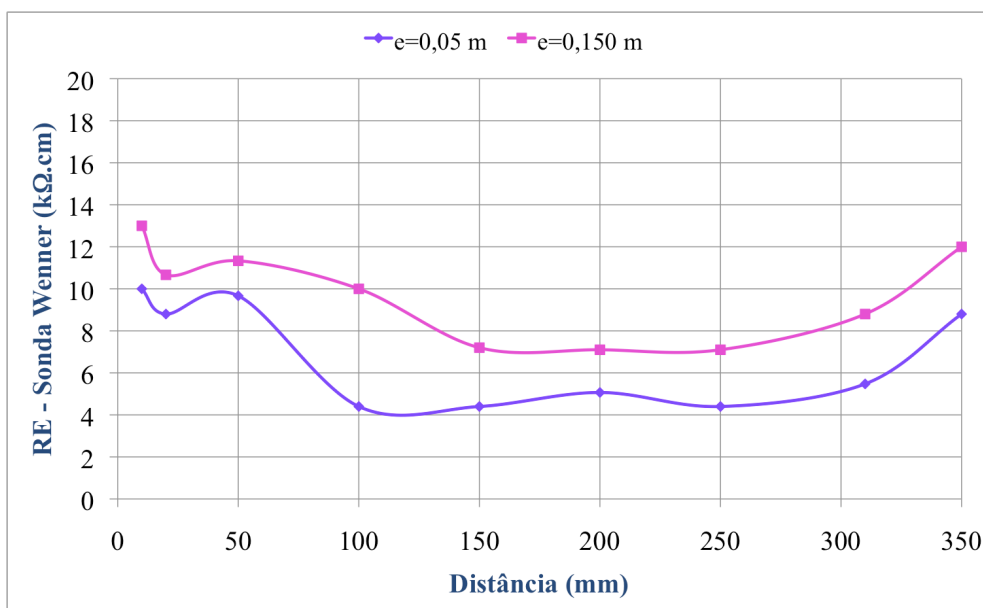


Figura 4.45 – Influência das espessuras de recobrimento na medição da RE avaliada aos 7 dias de idade.

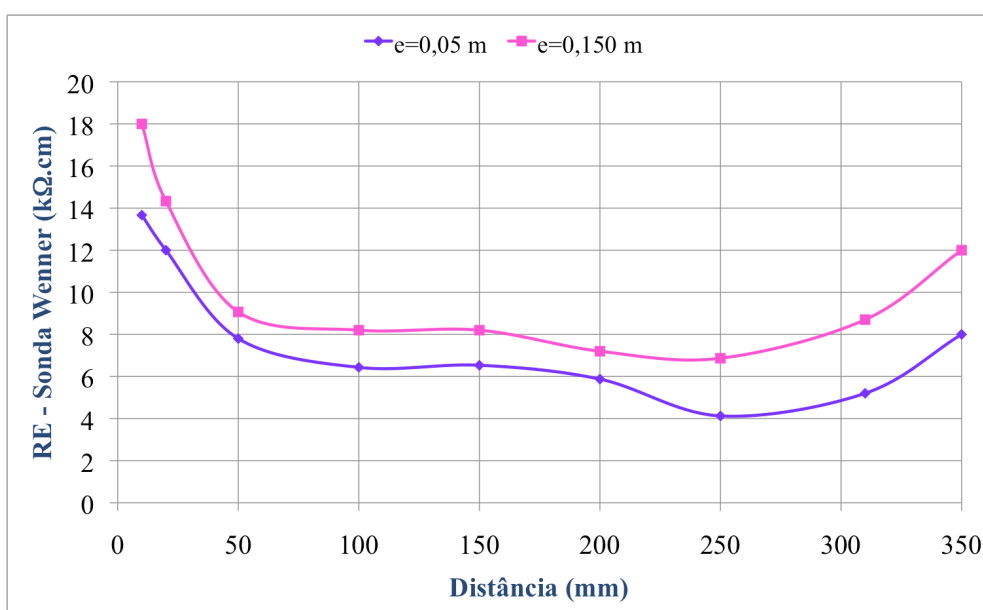


Figura 4.46 – Influência das espessuras de recobrimento na medição da RE avaliada aos 151 dias de idade.

4.9.2.3 Influência do posicionamento dos eléctrodos sobre a armadura

Uma outra abordagem na medição da resistividade eléctrica em lajetas de betão armado, usando a sonda Wenner (4-eléctrodos), foi avaliar o posicionamento da sonda sobre a armadura com os 4-eléctrodos (posição 1, 3, 4, e 4'), apenas os 2 pinos dos eléctrodos (posição 2), e na diagonal (posição 5 e 5'), de modo a não interceptar a armadura, como se apresenta na Figura 4.47. Os ensaios foram realizados nas duas faces, ou seja, na face de menor e de maior recobrimento, como se apresenta ilustrado nas Figuras seguintes (4.48 e 4.49), respectivamente. As medições de resistividade eléctrica realizadas ao longo do tempo, encontram-se apresentadas nas Figuras 4.50 e 4.51.

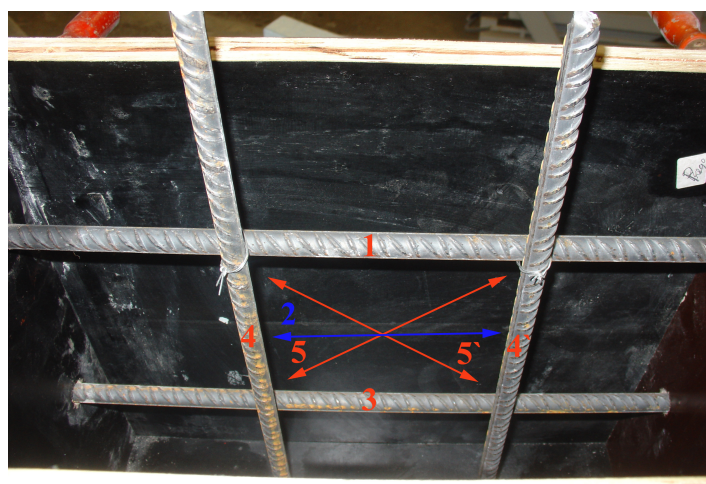


Figura 4.47 – Representação esquemática das medições de RE na lajeta B.

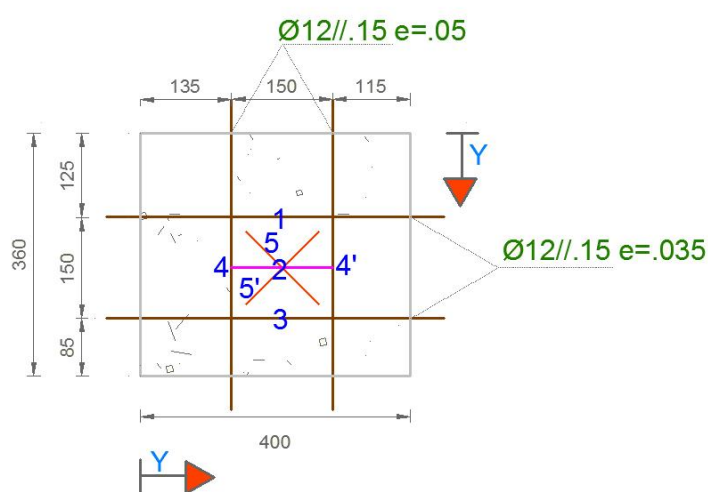


Figura 4.48 – Medições da RE na face de menor recobrimento.

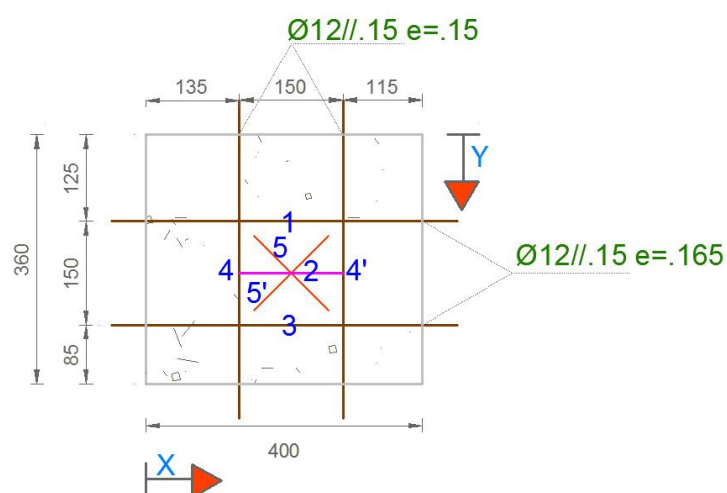


Figura 4.49 – Medições da RE na face de maior recobrimento.

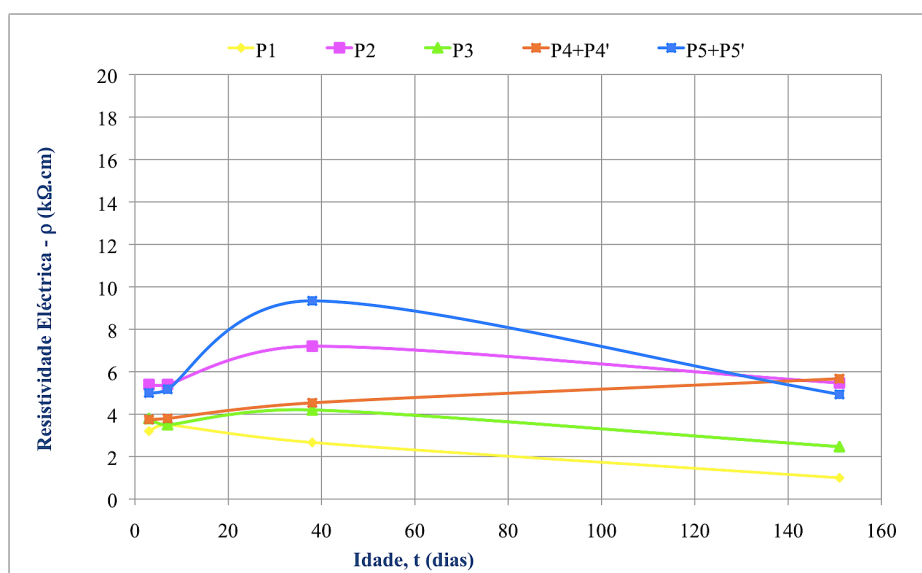


Figura 4.50 – Evolução da resistividade eléctrica com o tempo (menor recobrimento – 35 mm).

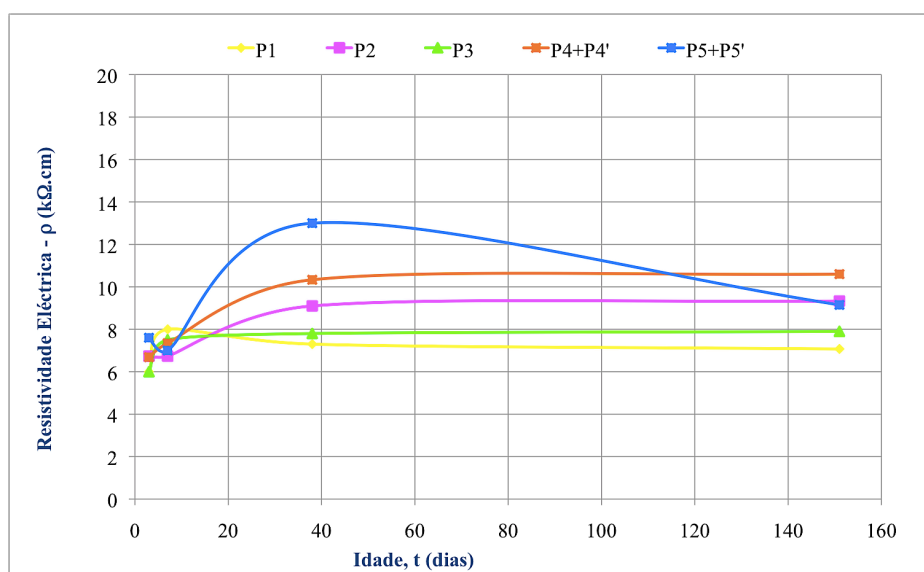


Figura 4.51 – Evolução da RE com o tempo (maior recobrimento – 165 mm).

Analisando a Figura 4.50 e 4.51 observa-se uma evolução da resistividade eléctrica ao longo do tempo. A espessura de recobrimento parece influenciar os resultados obtidos nas medições de resistividade eléctrica. As medições realizadas na laje de maior recobrimento (165 mm), são superiores às medições realizadas na direcção de menor espessura (35 mm).

Na Figura 4.52 e na Figura 4.53, apresenta-se um diagrama onde é possível observar a resistividade eléctrica em função da localização das medições (P1, P2, P3, P4+4' e P5+5').

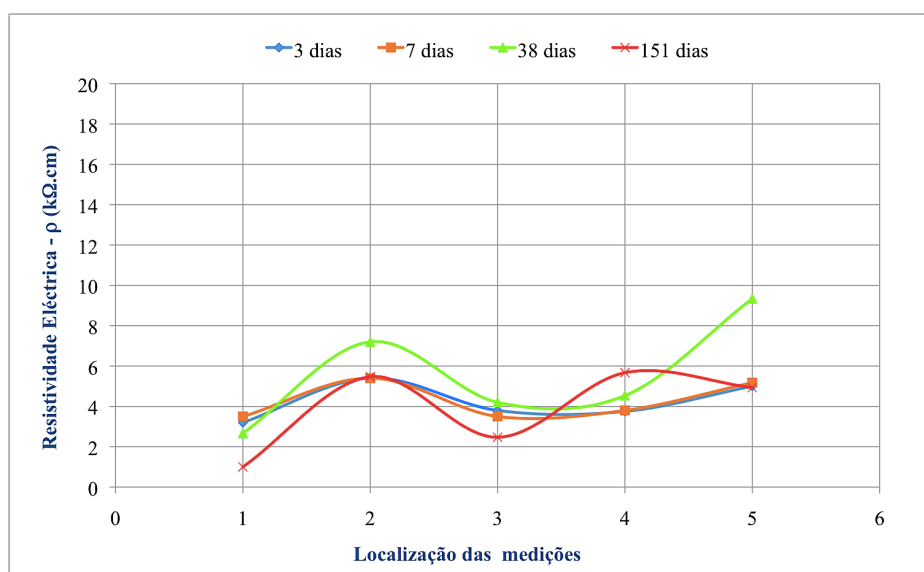


Figura 4.52 – Influência da localização dos eléctrodos na medição da RE (menor recobrimento).

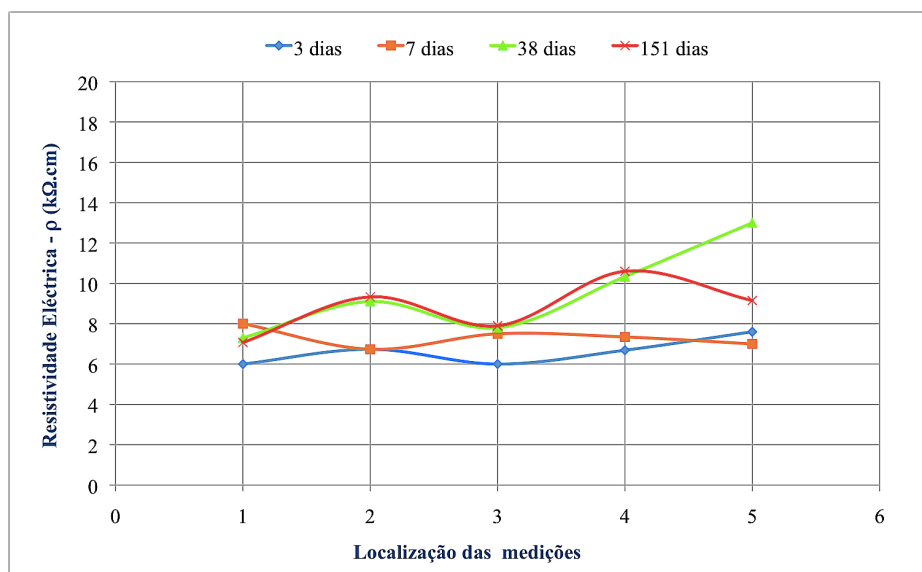


Figura 4.53 – Influência da localização dos eléctrodos na medição da RE (maior recobrimento).

Da análise das Figuras (4.52 e 4.53) observa-se que a posição 5 é a menos afectada pelas medições da resistividade eléctrica, de acordo com as recomendações descritas no item 3.4.3.2, ou seja, na presença de armadura realizar as medições na direcção diagonal. No que diz respeito à maior influência nas medições de resistividade eléctrica encontram-se as medições efectuadas sobre a posição 1 e a posição 3, como expectável.

Analizando a localização das medições de RE efectuadas na posição P1 e P3, comparativamente com a posição P2, observa-se que o posicionamento dos 4 ou dos 2-eléctrodos sobre a armadura, conduz a uma diminuição de resistividade eléctrica quando são colocados os 4-eléctrodos sobre a armadura, com uma diferença média observada ao longo do período em análise de aproximadamente 54 % e de 20 %, para a espessura de menor e de maior recobrimento, respectivamente.

Observando a posição P2 com a posição P5 e P5' para as diferentes espessuras de recobrimento aqui apresentadas, não se observam diferenças muito significativas.

Observando agora a posição P4 e P4' comparativamente com a posição P2, para a menor espessura de recobrimento, em que a armadura vertical tem um recobrimento de 50 mm, a RE realizada sobre a posição P2 conduz a um aumento de resistividade eléctrica, como expectável, de aproximadamente 46 %. Desta análise de médias

observadas, exclui-se as medições efectuadas aos 7 e 151 dias de idade, em que se observaram diferenças de apenas 3%.

Agora para a face de maior recobrimento, comparando a posição P4 e P4' com a posição P2, observam-se diferenças médias muito baixas, inferiores a 9 %, desta média foi excluída a medição realizada aos 24 dias de idade, por representar um valor atípico nas medições de resistividade eléctrica.

Comparando as diferenças observadas entre as faces de menor e de maior recobrimento, continua-se a observar que as espessuras de recobrimento influenciam a medição de resistividade eléctrica usando a técnica dos 4-eléctrodos, a diferença menos afectada parece ser a que envolve as medições efectuadas sobre a posição P2, com diferenças inferiores a 27 %.

Capítulo V – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Após a apresentação detalhada do trabalho desenvolvido que consta dos capítulos anteriores, apresentam-se neste capítulo, as conclusões de maior relevância.

As medições de resistividade eléctrica são influenciada por diferentes condições de cura, temperatura e humidade relativa. À medida que se aumenta a temperatura, aumenta a mobilidade dos iões que transporta a corrente eléctrica, fazendo baixar a resistividade eléctrica, considerando uma dada humidade relativa constante ou invariável. À medida que a humidade do betão diminui, diminui a quantidade de água presente nos poros que transporta a corrente, aumentando assim a resistividade eléctrica, considerando o mesmo referencial de temperatura.

A avaliação de diferentes técnicas de ensaio para medição da resistividade eléctrica, técnica dos 4-eléctrodos (Sonda Wenner) e a técnica dos 2-eléctrodos, em corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC), apresentaram resultados distintos mas com uma boa correlação entre as diferentes técnicas. Observa-se que as medições da resistividade eléctrica estimadas em provetes cúbicos e cilíndricos, usando a Sonda Wenner são superiores comparativamente às medições usando a técnica dos dois eléctrodos, as diferenças observadas foram de cerca de 45.7% (CA) e de 41.97% (CC) avaliada em provetes cúbicos de 150 mm de aresta. A mesma tendência se observa para provetes cilíndricos (ϕ 150 mm \times 300 mm), a resistividade eléctrica é mais

elevada usando a Sonda Wenner comparativamente à técnica dos 2-eléctrodos, tendo-se obtido diferenças de aproximadamente 67 % (CA) e de 55% (CC), respectivamente.

Também se observou que, na medição da resistividade eléctrica usando a técnica dos 2-eléctrodos, em corrente alternada e em corrente contínua, os resultados são ligeiramente diferentes. A medição da resistividade eléctrica usando a corrente alternada (CA) é mais baixa comparativamente com a medição em corrente contínua, com diferenças da ordem dos 7.17% avaliada em provetes cúbicos e 6.71 % em provetes cilíndricos.

A evolução da resistividade eléctrica ao longo do tempo apresenta um comportamento semelhante ao da resistência mecânica do betão. Os dois parâmetros, durabilidade e resistência mecânica, avaliados em diferentes idades, nomeadamente aos 1, 3, 8, 29 e 91 dias, apresentam uma boa correlação ao longo do tempo. A medição da resistividade eléctrica do betão constitui uma excelente metodologia a implementar em laboratório e na indústria da construção para o controlo de qualidade de betões, durante a fase construtiva e durante a fase de exploração.

A metodologia de previsão da resistência mecânica e da resistividade eléctrica, parece indicar uma excelente técnica para avaliar ao longo do tempo os parâmetros mecânicos e de durabilidade do betão. A correlação estabelecida entre a resistência Mecânica e a resistividade eléctrica para idade de maturação do betão até aos 29 dias, permite estimar a resistência mecânica sem prejuízo para o meio ambiente (produção de resíduos, consumo de energia), parece ser um excelente contributo para caracterizar a qualidade dos betões.

Para os métodos de regressão não linear, teóricos e empíricos, observa-se que, a evolução da resistência mecânica e da resistividade eléctrica tem a mesma tendência e são afectados pelos mesmos fenómenos, o que possibilita a previsão da evolução da resistividade eléctrica, ao longo do tempo (por exemplo, 29 e 91 dias de idade) com base nas expressões utilizadas para aferir a evolução da resistência mecânica, e assim prever o valor da resistividade eléctrica a qualquer idade. O interesse prático de aplicação desta metodologia é poder estimar ao longo do tempo a resistência mecânica com base no ensaio de resistividade eléctrica. Com os resultados

experimentais, podemos concluir que, a partir do ensaio de resistividade eléctrica, podemos controlar a qualidade do betão, em diferentes condições de humidade e temperatura. Assim, partir desta metodologia, desde que sejam mantidas todas as condições de fabrico de betão, podemos reduzir o número de ensaios de resistência mecânica, contribuindo também para a sustentabilidade da construção.

A avaliação da resistividade eléctrica em lajetas sem armadura (Lajeta A), tendo sido conduzidos em modelos relativamente pequenos, é possível concluir que, as medições realizadas junto ao bordo influenciam as medições de resistividade eléctrica, e este factor é independente da idade do betão.

Relativamente à lajeta com armadura (Lajeta B), a avaliação da resistividade eléctrica deverá ser realizada sempre que possível, numa zona mais afastada de elementos de aço. A presença de um elemento de aço faz baixar consideravelmente a medição da resistividade eléctrica. Se num dado elemento de betão armado, existirem diferentes espessuras de recobrimento, devem-se efectuar as medições de resistividade eléctrica na secção onde a espessura de recobrimento for maior, de modo a minimizar a influência da presença de elementos metálicos.

A resistividade eléctrica poderá ser um parâmetro adicional aos modelos de desempenho e de durabilidade de estruturas de betão armado, definidas em projecto. Este parâmetro poderá ser aferido durante a fase construtiva e na fase de exploração, contribuindo deste modo, para o desenvolvimento mais sustentável das estruturas, minimizando reparações e maximizando a vida útil das estruturas de betão armado.

No presente trabalho teria sido muito interessante efectuar o mesmo estudo, com um betão convencional (BC) e, dessa forma estabelecer as principais diferenças para o betão auto-compactável (BAC). Para um betão convencional, e para os níveis de resistência obtidos nas primeiras idades com o BAC, possivelmente teríamos uma maior relação água/ligante, e maior quantidade de agregados grossos. Ao nível dos parâmetros de durabilidade, a resistência à penetração dos cloretos, no caso do BAC foi média. No caso de um betão convencional como, regra geral, é um betão mais poroso, a resistência à penetração do ião cloro poderia ser mais facilitada. No BAC a menor razão água/ligante, maior quantidade de finos e a boa dispersão do cimento e

do filler, proporcionado pelo uso de superplastificante, podem justificar o desempenho melhorado.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Tendo por base o trabalho desenvolvido, destacam-se as seguintes as questões mais relevantes em termos de desenvolvimentos futuros, no domínio da durabilidade.

- o ensaio de permeabilidade ao oxigénio, em amostras cilíndricas de 50 mm de espessura e 150 mm de diâmetro, e correlacionar os respectivos resultados com outros parâmetros de durabilidade;
- avaliar a profundidade de carbonatação em amostras sujeitas a diferentes condições de cura, humidade e temperatura;
- avaliar a influência da resistividade eléctrica, sob diferentes condições de humidade, determinar o teor de humidade a diferentes profundidades do betão, se possível instrumentando os modelos com sensores de humidade;
- moldar modelos de lajes com armadura, induzir a corrosão acelerada e medir ao longo do tempo a velocidade de corrosão e a resistividade eléctrica;
- moldar lajetas com e sem armadura, com diferentes espessuras de recobrimento, e avaliar a influência das condições do meio ambiente (temperatura, humidade relativa, etc) nas medições da resistividade eléctrica.

BIBLIOGRAFIA

Andréa, R. (2010). Predicción de la durabilidad del hormogón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica". DEPARTAMENTO DE MECANICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORIA DE ESTRUTURAS. Madrid, ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS. TESIS DOCTORAL.

Camões, A. (2008). BETÕES ESPECIAIS. Guimarães, Universidade do Minho - Materiais de Construção Eco-eficientes. I.

Carino, N. J. eH. S. Lew (2001). THE MATURITY METHOD: FROM THEORY TO APPLICATION. Gaithersburg, MD 20899-8611 USA, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology

Coutinho, A. S. eA. Gonçalves (1994). FABRICO E PROPRIEDADES DO BETÃO. Lisboa, Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações Laboratório de Engenharia Civil,

EFCA (2005). The European Guidelines for Self Compacting Concrete. Specification, Production and Use: 68.

Elis, V. R. (2011),(2011). "MÉTODOS ELÉTRICOS E ELETROMAGNÉTICOS." Retrieved 7 de Janeiro, 2011, from <http://www.iag.usp.br/siae98/eletromag/eletrica.gif>.

Ferreira, M. e S. Jalali (2000). Quality control based on electrical resistivity measurements.

Ferreira, R. M. (2000). AVALIAÇÃO DE ENSAIOS DE DURABILIDADE DO BETÃO. Guimarães, Universidade do Minho. Mestrado em Materiais e Reabilitação da Construção.

Ferreira, R. M. e J. Gulikers (2008). Considerações sobre avaliação do estado limite de utilização de durabilidade. BE 2008 - Encontro Nacional de Betão Estrutural 2008. Guimarães.

Ferreira, R. M. eS. Jalali (2009). "NDT measurements for the prediction of 28-day compressive strength." NDT&E International 43: 55-61.

Figueiras, H., J. S. Coutinho, C. Andrade e C. Félix (2008). Desempenho do Kit-sensor de corrosão na monitorização da durabilidade de estruturas de betão. Encontro Nacional Betão Estrutural 2008. BE2008. Guimarães: 1-10.

Figueiras, H., L. Maia, S. Nunes, J. S. Coutinho eJ. Figueiras (2010). Optimização de uma argamassa destinada a BAC de elevada durabilidade. bac2010 - 2.º Congresso Ibérico sobre betão auto-compactável. Guimarães: 1-10.

Figueiras, H. I. M. (2006). ESTUDO E DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE COMPOSIÇÕES DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL. AFERIÇÃO DAS SUAS CARACTERÍSTICAS MECANICAS E DURABILIDADE. Departamento de Engenharia Civil. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil.

Gowers, K. R. eS. G. Millard (1999a). "Measurement of Concrete Resistivity for Assessement of Corrosion Severity of Stell Using Wenner Technique." ACI Materials Journal 96: 536-541.

Gowers, K. R. eS. G. Millard (1999b). "Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique." ACI Materials Journal 96: 536-541.

Hoppe, T. F. (2005). Resistividade Eléctrica de Concretos Contendo Diferentes Teores de Cinza de Casca de Arroz. Santa Maria, Brasil, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). Mestrado em Engenharia Civil: 147.

Hughes, B. P., A. K. O. Soleit e R. W. Brierly (1985). "New Technique for Determining the Electrical Resistivity of Concrete." Magazine of Concrete Research 37 N.º 133: 243-248.

Hunkeler, F. (1996). "The Resistivity of Pore Water Solution - A Decisive Parameter of Rebar Corrosion and Repair Methods." Construction and Building Materials 10: 381-389.

INSTRUMENTS, G. (2009), (2009). "MERLIN Bulk Conductivity Tester." Retrieved 2 de Dezembro de 2009, 2009.

IPQ (2003). Ensaio do betão endurecido NP EN 12390-3 2003 parte 3 resistência à compressão dos provetes de ensaio 0007. Caparica, IPQ.

IPQ (2008). Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Caparica, IPQ.

IPQ (2010a). Ensaio do Betão Fresco. Betão autocompactável: Ensaio de escoamento no Funil V. Caparica, Portugal, IPQ. NP EN 12350-9 / 2010.

IPQ (2010b). Ensaio do betão fresco. Betão autocompactável: Ensaio de espalhamento. Caparica, Portugal, IPQ. NP EN 12350-8 / 2010.

Keller, G. V. (1982). "Electrical Properties of Rocks and Materials." Handbook of Physical Properties of Rocks I: 217-293.

LNEC (2004). E 463 - Determinação do Coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. Lisboa, Portugal, LNEC.

Malhotra, V. M. e N. J. Carino (2004). HANDBOOK ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE. United States of America,

Medeiros, M. H. F. (2001). Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade eléctrica de estruturas de concreto armado. B. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo. São Paulo, Brasil. 12.

Minho, L. C.-U. d. (2005). RESISTIVIDADE ELÉCTRICA: Medição da resistividade eléctrica de uma superfície de um elemento de betão. PE-002: 1-9.

Monfore, G. E. (1968). "THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONCRETE." PCA - Research and Development Laboratories 10, n.º 2: 35-48.

Morris, W., E. I. Moreno eA. A. Sagués (1996). "PRATICAL EVALUATION OF RESISTIVITY OF CONCRETE IN TEST CYLINDERS USING A WENNER ARRAY PROBE." Cement and Concrete Research 26: 1779-1996.

nordtest method, N. B. (1991-11). CONCRETE, MORTAR AND CEMENT-BASED REPAIR: CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE MIGRATION EXPERIMENTS: 8.

Nunes, S. C. B. (2001). Betão Auto-Compactável - Tecnologia e Propriedades. Departamento de Engenharia Civil. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil.

Peres, L. D. P., M. P. Barbosa eR. C. A. Pinto (2005). Aplicação do Método da Maturidade na avaliação da resistência à compressão de peças pré-moldadas. 1.º Encontro Nacional de Pesquisa-Projecto-Produção em Concreto Pré-moldado. São Carlos, Brasil.

Polder, R., C. Andrade, B. Elsener, O. Vennesland, G. R., W. R. e R. M. (2000). "RILEM TC 154-ECM: ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES FOR MEASURING METALLIC CORROSION. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete." Materials 33: 603-611.

Polder, R. B. (2001). "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation." Construction and Building Materials 15: 125-131.

Sengul, O. eO. E. Gjorv (2008). "Electrical Resistivity Measurements for Quality control During Concrete Construction." ACI Materials Journal 105: 541-547.

Sengul, O. e O. E. Gjorv (2009). "Effect of Embedded Steel on Electrical Resistivity Measurements on Concrete Structures." ACI Materials Journal 106: 11-18.

Silva, B. J. M. (2005). Estruturas Inteligentes Utilizando Betão e Polímero Reforçado com Fibras de Carbono. Departamento de Engenharia Civil. Guimarães, Universidade do Minho. Mestrado em Engenharia Civil - Processos e Gestão da Construção: 119.

Silva, L. M. G. (2007). Caracterização das Propriedades Termo-Mecânicas do Betão nas Primeiras Idades para Aplicação Estrutural. Departamento de Engenharia Civil. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil: 224.

Whiting, D. A. e M. A. Nagi (2003). Electrical Resistivity of Concrete - A Literature Review - R&D. 2457. Skokie, USA, Portland Cement Association.

ANEXO A - MATURIDADE

1.1 Introdução

O método da maturidade permite uma previsão da resistência mecânica do betão, a partir do historial de temperatura, sendo possível determinar, por exemplo, em elementos estruturais, e apoiar na tomada de decisão no que diz respeito à retirada das cofragens (Peres *et al.*, 2005). O método da maturidade teve a sua origem na Inglaterra com base em curas térmicas.

Silva (2007) de acordo com a lei de maturidade definida por Saul (D'Aloia 2002): "... dois betões com a mesma composição química e com o mesmo grau de maturidade têm a mesma resistência mecânica qualquer que seja o historial de temperaturas que conheceu a esse grau de maturidade".

Segundo Nurse, ao estudar este tipo de efeito, definiu que a diferença entre a temperatura a que o betão foi submetido, T , e a temperatura na qual o betão se mantém sem alteração da sua tensão de rotura com o Tempo, T_0 – temperatura de referência. Determinaram que a temperatura de referência apresentava o seguinte valor: $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, (Coutinho *et al.*, 1994).

Posteriormente ao trabalho de Nurse, Saul, chamou maturidade M , ao produto do

tempo (Δt – dias ou horas), pela diferença entre a temperatura de referencia T_0 , e a temperatura a que o betão esteve submetido, T (Coutinho *et al.*, 1994).

$$M(t) = \sum (T - T_0) \times \Delta t \quad [A.1]$$

As unidades da expressão apresentada na equação [A.1] são: dias ou horas vezes graus centígrados.

Conclui-se que, a tensão de rotura é função do somatório dos produtos de intervalos de tempo, Δt , pela diferença entre a temperatura a que o betão esteve sujeito e a temperatura de referência.

Freiesleben-Hansen e Pedersen (Carino, 1991), baseados na equação de Arrhenius para a cinética das reacções, definiram uma função de maturidade em termos de idade equivalente, com base nas reacções de hidratação, na temperatura desejada e na temperatura de referência, considerando o parâmetro de sensibilidade térmica da mistura cimentícia, denominado energia de activação, (Coutinho *et al.*, 1994).

A equação seguinte [A.2] é a que melhor traduz a sensibilidade da temperatura nas velocidades das reacções do cimento, mas será necessário conhecer a energia de activação.

$$t_e = \sum e^{-\left[\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_r}\right)\right]_{\Delta t}} \quad [A.2]$$

em que:

t_e - idade equivalente à temperatura de referência - T_r ;

Ea - energia de activação (kJ/mol);

T_a - temperatura média observada no intervalo de tempo Δt ;

T_r - temperatura de referencia (K);

Δt - intervalo de tempo (h) e

R - constante universal dos gases perfeitos (8.314 kJ/mol).

No Eurocódigo 2 (IPQ, 2008), está definido uma expressão de correcção, em condições de cura elevadas ou baixas, no intervalo de temperaturas de 0 °C a 80 °C,

corrigindo a idade do betão de acordo com a expressão seguinte:

$$t_T = \sum_{i=1}^n e^{-(4000/[273+T(\Delta t_i)]-13.65)} * \Delta t_i \quad [A.3]$$

em que:

t_T – idade do betão corrigida em função da temperatura, que substitui t nas expressões correspondentes;

$T(\Delta t_i)$ - temperatura em °C durante o intervalo de tempo Δt_i e

Δt_i - número de dias em que se mantêm a temperatura T.

1.2 Evolução da resistência mecânica

No Eurocódigo 2 (IPQ, 2008), é apresentada uma lei de evolução da resistência mecânica à compressão do betão, com base no conceito da idade equivalente, e que apresenta o seguinte formato:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \times f_{cm} \quad [A.4]$$

$$\beta_{cc}(t) = e^s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad [A.5]$$

em que:

$f_{cm}(t)$ - resistência média de rotura do betão à idade de t dias;

f_{cm} - tensão média de rotura à compressão do betão aos 28 dias de idade;

$\beta_{cc}(t)$ - coeficiente que depende da idade do betão t ;

t - idade do betão em dias;

s - coeficiente que depende do tipo de cimento utilizado;

$s = 0.25$ para cimentos das classes de resistência CEM 42.5R, CEM 52.5N e CEM 52.5R;

$s = 0.35$ para cimentos das classes de resistência CEM 32.5R, CEM 32.5 N e

$s = 0.38$ para cimentos das classes de resistência (CEM 32.5 N).

1.3 Energia de activação

A energia de activação aparente (E_a) que caracteriza a sensibilidade à temperatura da reacção de hidratação do cimento presente no betão, apresenta-se como uma das entidades importantes da lei de ARRHENIUS, e possivelmente a mais difícil de quantificar (Silva, 2007).

A reacção da água com o cimento não é uma reacção simples de um composto quimicamente puro com a água, por este motivo se designa por aparente.

A determinação da energia de activação pode ser efectuada experimentalmente, nomeadamente por ensaios mecânicos ou calorimétricos.

O ensaio mecânico mais utilizado para determinação da Energia de activação (E_a) consiste no ensaio clássico de resistência mecânica à compressão simples sujeito a diferentes condições de cura, procedimento de ensaio descrito na norma ASTM C1074-98. Com este tipo de ensaio mecânico podem obter-se coeficientes de variação elevados, e por outro lado este ensaio mecânico não traduz o carácter puramente química da reacção de hidratação de hidratação do cimento (Silva, 2007) a partir de Kada – Benaneur *et al.* 2000).

A determinação de E_a a partir de técnicas calorimétricas é apenas possível recorrendo a calorimetria isotérmica, submetendo as amostras a diferentes temperaturas (Silva, 2007). A principal limitação desta técnica é a utilização de uma pequena amostra de pasta de cimento e não do material betão. Existem, ainda, outros factores que influenciam a modificação da cinética da reacção de hidratação (Silva, 2007) a partir de D'Aloia, 2002), nomeadamente o tipo de agregados, relação w/c, adjuvantes e adições.

Peres *et al.* (2005) compararam valores de energia de activação obtidos experimentalmente por testes mecânicos e calorimétricos. O procedimento de ensaio contemplou três temperaturas de cura (10 °C, 20 °C e 40 °C). Os autores concluíram que os dois testes resultaram em valores similares de energia de activação (E_a), com uma diferença de aproximadamente 3 kJ/mol.

ANEXO B - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

2.1 Introdução

Segundo a recomendação de diversos autores (Polder *et al.*, 2000), (Gowers *et al.*, 1999b), a medição da resistividade eléctrica no betão deve ser efectuada em corrente alternada (CA). O gerador de corrente alternada, deverá permitir a aplicação de frequências compreendidas entre 50 Hz e 1 kHz (Polder *et al.*, 2000) ou outro tipo de frequência desde que justificada cientificamente.

Gowers *et al.* (1999b), recomenda que as medições sejam realizadas com uma frequência relativamente baixa em corrente alternada (CA), e que os resultados se aproximam das medições em corrente contínua (CC). Na prática, é usual aplicar uma onda quadrada com uma frequência menor que 30 Hz ou uma onda sinusoidal menor que 1 Hz. Equipamento em corrente contínua não é aconselhável devido ao efeito de induzir a polarização dos eléctrodos, traduzindo-se em erros significativos.

2.2 Objectivos

De modo a poder avaliar a influência do tipo de corrente aplicada, alternada ou contínua, desenvolveu-se um trabalho preliminar para medição da resistividade eléctrica usando a técnica dos 2-eléctrodos, por aplicação de dois eléctrodos constituídos por uma chapa de aço inox de aproximadamente 1.95 mm de espessura. A avaliação da resistividade eléctrica foi conduzida em provetes cúbicos de 150 mm de aresta.

2.3 Estudo preliminar

A avaliação da resistividade eléctrica foi realizada ao longo do tempo, 6, 7, 14, 17, 21 e 28 dias de idade, usando apenas a técnica dos 2-eléctrodos.

A medição da resistividade eléctrica em corrente alternada (CA) até ao sétimo dia de idade foi realizada utilizando uma onda sinusoidal com uma frequência de 100 Hz. À idade dos 14 dias, ao realizar o ensaio de resistividade eléctrica, observou-se que, utilizando uma frequência de 100 Hz, esta frequência motivava valores de resistividade eléctrica muito heterogéneos, com coeficientes de variação não aceitáveis para o material em estudo. Alterando o valor da frequência verificou-se que para a técnica dos dois eléctrodos, a frequência de 10 kHz apresentava boa reprodutibilidade nos resultados. Assim, em todo o programa experimental desenvolvido adoptou-se uma onda sinusoidal com uma frequência de 10 kHz.

2.3.1 Apresentação de resultados

Na Figura B.1 é possível observar a evolução da resistividade eléctrica ao longo do tempo em corrente contínua e em corrente alternada. Na Figura B.2 apresenta-se a resistência eléctrica versus o tipo de corrente aplicada, alternada e contínua.

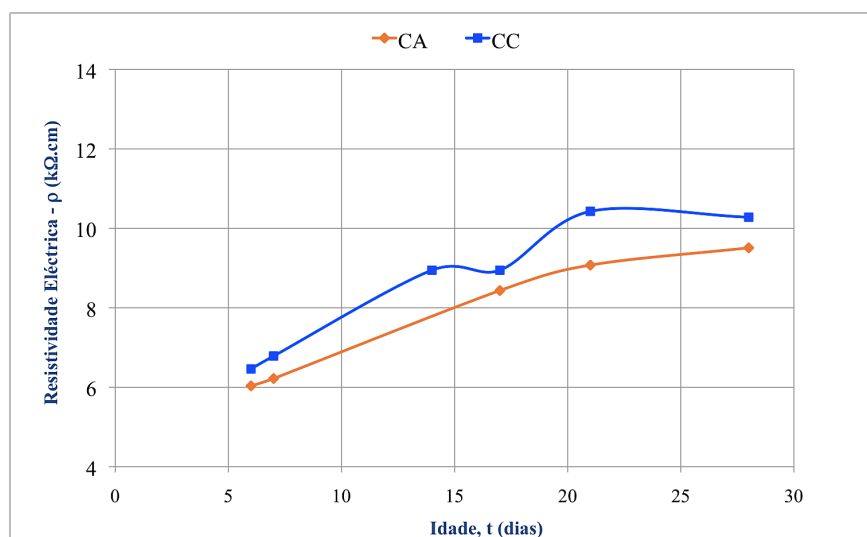


Figura B.1 – Evolução da resistividade eléctrica com o tempo.

As medições da resistividade eléctrica usando corrente contínua são mais elevadas comparativamente com a medição em corrente alternada, aos 7 dias de idade. O coeficiente de variação foi de 9.1 %, e aos 28 dias de idade foi de 8.1 %.

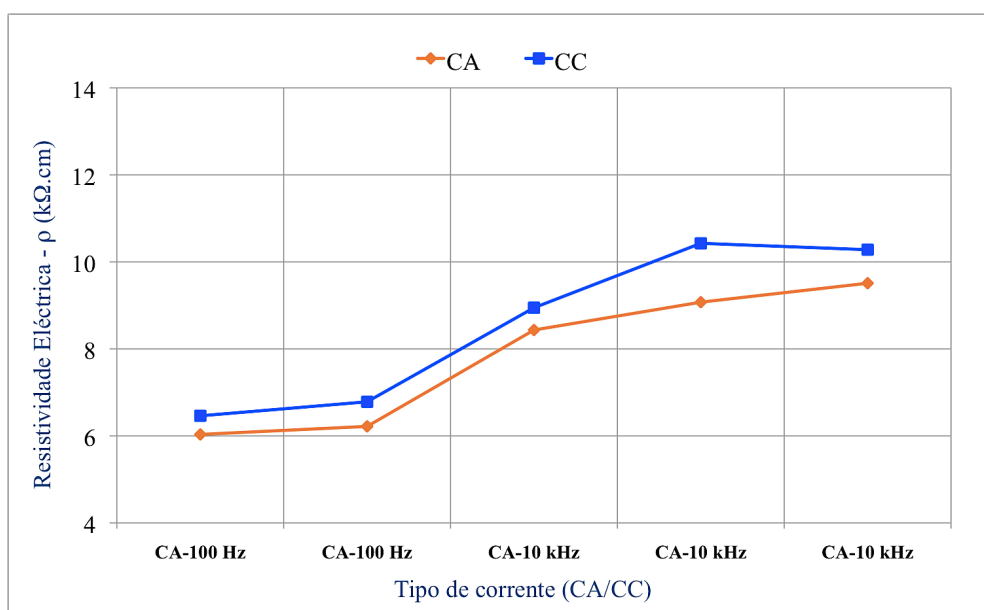


Figura B.2 – Influência do tipo de corrente na medição da resistividade eléctrica.

Da análise da Figura B.2 apresenta-se o tipo de frequência aplicada no estudo preliminar (100 Hz), tendo-se verificado que com a evolução do tempo esta frequência originava erros na medição, impossíveis de traduzir graficamente, tendo sido adoptada uma nova frequência de (10 kHz). Na Figura B.3 ilustra-se a resistividade eléctrica versus diferentes tipos de frequência aplicada em corrente alternada e também em corrente contínua.

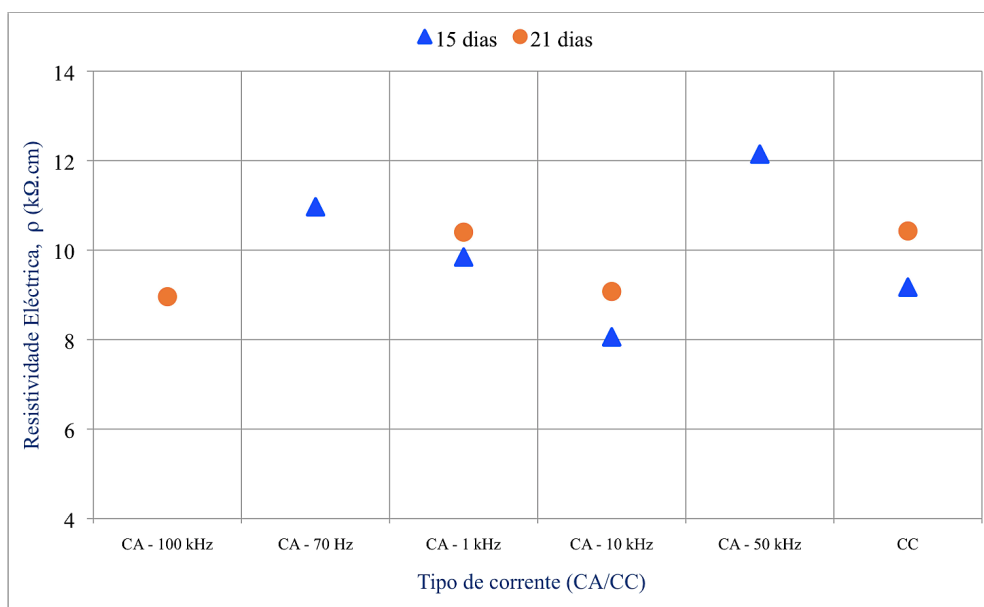


Figura B.3 – Influência do tipo de corrente na medição da resistividade eléctrica.

É possível observar que, o tipo de frequência aplicada influencia a medição da resistividade eléctrica comparativamente com a medição realizada em corrente contínua.

De salientar que esta anomalia observa-se apenas quando os eléctrodos são colocados exteriormente. Outros estudos experimentais desenvolvidos no LABEST demonstraram que se os eléctrodos estiverem embebidos, a frequência de 100 Hz, tem boa reprodutibilidade nos resultados, quer em provetes de betão quer em provetes de argamassa. Dependendo da geometria dos eléctrodos e do seu posicionamento na estrutura, isto é, externos ou embebidos, próximos ou afastados de uma superfície, as linhas de fluxo de corrente que se formam entre os dois eléctrodos serão diferentes.

A resistência de contacto eléctrodo-betão influencia as medições de resistividade eléctrica. Para uma dada diferença de potencial aplicada, o aumento da resistência de contacto entre o eléctrodo e a superfície do betão reduz a corrente que atravessa a amostra de betão. No caso de eléctrodos exteriores, a intensidade da força aplicada para manter os eléctrodos em contacto com o betão pode influenciar o resultado da resistividade eléctrica, havendo uma tendência de redução da resistência eléctrica com o aumento da intensidade da força aplicada (Whiting *et al.*, 2003).

2.4 Considerações finais

O tipo de frequência aplicada em corrente alternada faz variar a medição da resistividade eléctrica. A medição da resistividade eléctrica em corrente alternada usando uma frequência de 10 kHz, é mais baixa comparativamente com a medição em corrente contínua.